



André Filipe Domingos Bandeira

Licenciado em Ciências de Engenharia Civil

Caracterização de argamassas de cal aérea e de cal hidráulica natural com metacaulino Evolução com a idade

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil – Perfil Construção

Orientador: Maria Paulina Santos Forte de Faria Rodrigues, Professora
Doutora, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade
Nova de Lisboa

Co-orientador: António Manuel dos Santos Silva, Doutor, Laboratório Nacional
de Engenharia Civil

Júri:

Presidente: Prof^a. Doutora Zuzana Dimitrovova

Arguente: Doutora Maria do Rosário da Silva Veiga

Vogais: Prof^a. Doutora Maria Paulina Santos Forte de Faria Rodrigues
Doutor António Manuel dos Santos Silva



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Dezembro de 2012

'Copyright' André Filipe Domingos Bandeira, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

AGRADECIMENTOS

Finalizada mais uma etapa, considero importante enumerar as pessoas que directa e indirectamente me ajudaram e me acompanharam, não só na realização desta dissertação como em todo o percurso académico.

Quero prestar um especial agradecimento à Professora Doutora Paulina Faria, orientadora científica do presente trabalho, pela total disponibilidade e auxílio durante a elaboração do mesmo, pelo conhecimento transmitido e pela simpatia demonstrada. A sua exigência, rigor e conhecimento tornaram o trabalho realizado numa experiência bastante enriquecedora.

Ao Engenheiro Vítor Silva, ajuda incansável em todo o desenvolvimento experimental realizado no DEC/FCT-UNL, gostaria de agradecer os ensinamentos durante a realização dos ensaios. O seu sentido prático e eficaz, a sua disponibilidade e amizade facilitaram muito a execução do trabalho realizado.

Gostaria de agradecer também ao Doutor António Santos Silva, co-orientador científico, pelo conhecimento transmitido e pela ajuda fulcral relativamente à análise química e mineralógica realizada no LNEC, fundamentais para a realização deste trabalho.

Agradeço também ao Dr. André Gameiro, bolseiro do projecto METACAL, pela ajuda essencial no desenvolvimento experimental realizado no LNEC, onde demonstrou completa disponibilidade quer na sua realização, quer na sua análise.

Pela disponibilidade dos resultados obtidos e pelo constante esclarecimento de dúvidas e conselhos ao longo da realização da presente dissertação, quero agradecer aos autores dos estudos anteriormente realizados, João Carneiro e Tiago Branco, que possibilitaram o enriquecimento do presente estudo.

Aos colegas e futuros engenheiros Daniel Cardoso, Duarte Mergulhão, João Grilo, Ricardo Vieira e Rui Antunes gostaria de agradecer pela colaboração e pela troca de ideias, durante a realização do desenvolvimento experimental. Gostaria ainda de agradecer à minha prima Ângela Bandeiras pela parcial revisão ortográfica da dissertação.

À minha namorada, Liliana Fonseca, não só pelos conselhos directos durante a realização do presente trabalho, mas por toda a paciência e companheirismo dentro e fora da vida académica. Pela sua amizade, tolerância e respeito ao longo de todo este tempo.

Porque o caminho não foi percorrido sozinho, quero agradecer a todos os meus amigos, dentro e fora da faculdade, pela companhia nos momentos de estudo e trabalho e, não menos importante, de convívio, diversão e espírito académico durante este percurso. A lista é extensa e difícil de enumerar sem esquecer alguém, mas sou consciente que os referentes sabem quem são.

Por fim, e mais importante, à minha família e especialmente aos meus pais, Albino e Delfina, quero agradecer todo o apoio, em que o financeiro se tornou o menos relevante, pela coragem transmitida, confiança, paciência e compreensão durante os meus 5 anos de percurso académico e pelos conhecimentos e conselhos de uma vida inteira.

RESUMO

O conhecimento das características físicas, químicas e mecânicas e o contexto da aplicação das argamassas de cal são fundamentais em processos de reparação, conservação e reabilitação, ou mesmo em obra nova, onde estas sejam aplicadas.

Em dois estudos distintos anteriormente realizados foram avaliadas argamassas de cal aérea hidratada (CL) e de cal hidráulica natural (NHL). Em ambos foi estudada a influência da substituição parcial de ligante por metacaulino, utilizado em diferentes percentagens de substituição. Nas argamassas CL foram ainda avaliadas as características de três traços volumétricos distintos, sujeitas a cura húmida. As argamassas NHL foram todas realizadas com o mesmo traço volumétrico, sendo também avaliada a influência do tempo de amassadura, bem como o seu tipo de cura. No seguimento desses estudos, o presente trabalho permitiu avaliar as características dessas argamassas ao fim de 180 dias de cura e analisar a evolução ocorrida até essa idade.

Verificou-se, através dos resultados obtidos, uma genérica melhoria das características mecânicas nas argamassas de ambas as cals com metacaulino face às argamassas sem a pozolana. Estas características aumentam quanto maior for o traço (argamassas CL) e quando sujeitas a cura húmida (argamassas NHL). Os diferentes tempos de amassadura utilizados na produção de argamassas NHL não são significativos. Na presença de metacaulino, algumas das argamassas de cal aérea pioram o seu comportamento face à água (absorção capilar e secagem).

Avaliando ainda a evolução com a idade observou-se, nas argamassas só de cal aérea, um crescimento progressivo das suas características mecânicas, provocado essencialmente pela evolução da reacção de carbonatação. No entanto, nas argamassas com metacaulino na sua constituição, ocorre um decréscimo da sua resistência com a idade, fundamentalmente devido à dissipação de compostos instáveis que se formaram em idade jovem. Todas as argamassas de cal hidráulica natural diminuíram as suas características mecânicas ao longo do tempo.

PALAVRAS-CHAVE:

Cal aérea hidratada, cal hidráulica natural, metacaulino, argamassa, reabilitação de edifícios, ensaios de caracterização.

ABSTRACT

The knowledge of physical, chemical and mechanical characteristics and the context of lime mortars usage are fundamental on repair, maintenance and rehabilitation processes, or even on new construction, where the mortars may be applied.

In two different researches previously performed, hydrated air lime (CL) and natural hydraulic lime (NHL) mortars were evaluated. In both, the influence of the partial replacement of binder for metakaolin was studied; various percentages of replacement were used. On the CL mortars the characteristics of three different binder:aggregate ratio (in volume) were also evaluated, when submitted to humid cure. All the NHL mortars were produced with the same binder:aggregate volumetric ratio, being evaluated not only the influence of the mixing time but also the type of cure. Following these studies, the present work, presents the evaluation of the mortars characteristics after 180 days of curing and the evolution of these mortars characteristics with age.

By analysing the obtained results, a general improvement of the mechanical characteristics of both lime mortars with metakaolin was observed against the mortars without the pozzolan. These characteristics are improved with stronger binder ratios (CL mortars) and when submitted to humid cure (NHL mortars). The different mixing times used in NHL mortars manufacture were not significant. On the presence of met kaolin, it was realised that some air lime mortars worsen their water behaviour.

By evaluating the aging process it was observed, on air lime mortars without metakaolin, a progressive increase of their mechanical characteristics, primarily caused by the carbonation reactions evolution. However, on lime-metakaolin mortars, mechanical resistance decreases with age, mainly due to dissipation of unstable compounds through time, which were formed at young age. All the natural hydraulic lime mortars decreased their mechanical characteristics as time went by.

KEY-WORDS:

Air hydrated lime, natural hydraulic lime, metakaolin, mortar, building rehabilitation, characterization tests.

ÍNDICE DE TEXTO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Enquadramento	1
1.2. Objectivos e metodologia	2
1.3. Estrutura do trabalho.....	2
2. ESTADO DO CONHECIMENTO	5
2.1. Estado actual e perspectiva futura da construção em Portugal: a importância de conservar e reabilitar.....	5
2.2. Matérias-primas	7
2.2.1. Cal aérea	7
2.2.2. Cal hidráulica	8
2.2.3. Metacaulino.....	9
2.3. Argamassas de cal com pozolanas	10
2.4. Exigências funcionais das argamassas	11
3. DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL.....	15
3.1. Matérias-primas utilizadas.....	15
3.1.1. Agregado	15
3.1.2. Ligantes – cal aérea e cal hidráulica natural	16
3.1.3. Metacaulino.....	18
3.2. Argamassas ensaiadas	18
3.2.1. Argamassas de cal aérea.....	19
3.2.2. Argamassas de cal hidráulica.....	20
3.3. Fabrico de argamassas: amassaduras, provetes e condições de cura.....	21
3.4. Ensaio de caracterização	24
3.4.1. Módulo de elasticidade dinâmico.....	25
3.4.2. Resistência à tracção por flexão.....	27
3.4.3. Resistência à compressão.....	28
3.4.4. Absorção de água por capilaridade	29
3.4.5. Secagem.....	32
3.4.6. Porosidade aberta e massa volúmica aparente.....	35
3.4.7. Condutibilidade térmica	37
3.4.8. Resistência aos sulfatos.....	39
3.4.9. Porosimetria de mercúrio.....	40
3.4.10. Caracterização térmica e mineralógica	42
3.4.10.1. Análise por difracção de raios X (DRX).....	42
3.4.10.2. Análise termogravimétrica e análise termogravimétrica diferencial (TG-DTG)	44

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS	47
4.1. Módulo de elasticidade dinâmico.....	47
4.2. Resistência à tracção por flexão e à compressão	50
4.3. Absorção de água por capilaridade	54
4.4. Secagem	59
4.5. Porosidade aberta e massa volúmica aparente	64
4.6. Condutibilidade térmica.....	66
4.7. Resistência aos sulfatos.....	67
4.8. Porosimetria de mercúrio	72
4.9. Difracção de raios X e análise termogravimétrica	76
5. DISCUSSÃO DE RESULTADOS.....	87
5.1. Resultados obtidos em argamassas de cal aérea.....	87
5.1.1. Análise global dos resultados das argamassas aos 180 dias	89
5.1.2. Evolução com a idade	94
5.2. Resultados obtidos em argamassas de cal hidráulica natural	101
5.2.1. Análise global de resultados das argamassas aos 180 dias.....	102
5.2.2. Evolução com a idade	104
5.3. Avaliação exigencial das argamassas estudadas	111
6. CONCLUSÕES.....	117
6.1. Principais conclusões.....	117
6.2. Sugestões para desenvolvimentos futuros	119
BIBLIOGRAFIA	121
ANEXOS.....	i
A.1. Dados climáticos da sala de cura húmida.....	i
A.2. Resultados individuais do módulo de elasticidade dinâmico	ii
A.3. Resultados individuais da resistência à tracção e à compressão	v
A.4. Resultados individuais de absorção de água por capilaridade	vii
A.5. Resultados individuais de secagem.....	xi
A.6. Resultados individuais de porosidade aberta e massa volúmica aparente	xv
A.7. Resultados individuais de condutibilidade térmica	xvii
A.8. Resultados individuais de resistência aos sulfatos.....	xix
A.9. Resultados da análise por difracção de raios X (DRX).....	xxiii

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Reabilitações do edificado e construções novas em Portugal, entre 1995-2011	6
Figura 3.1 – Areias AREIOR utilizadas.	15
Figura 3.2 – Curvas granulométricas das areias e da respectiva mistura	16
Figura 3.3 – Cal aérea e cal hidráulica NHL5 utilizadas	17
Figura 3.4 – Metacaulino Imerys Argical M 1200 S utilizado nas argamassas	18
Figura 3.5 – Diferentes fases do processo de fabricação de argamassas	22
Figura 3.6 – Moldes prismáticos utilizados preenchidos com argamassa	23
Figura 3.7 – Salas de cura húmida e de cura <i>standard</i>	23
Figura 3.8 – Sequência de utilização dos provetes nos ensaios	25
Figura 3.9 – Equipamento ZEUS Resonance Meter utilizado na determinação do Ed.....	25
Figura 3.10 – Software do equipamento ZEUS Resonance Meter	26
Figura 3.11 – Ensaio de resistência à tracção por flexão	27
Figura 3.12 – Ensaio de resistência à compressão	28
Figura 3.13 – Aspecto dos provetes antes do início do ensaio de absorção capilar.....	30
Figura 3.14 – Ensaio de absorção capilar.....	31
Figura 3.15 – Coeficiente de capilaridade determinado por regressão linear.....	31
Figura 3.16 – Ensaio de secagem	32
Figura 3.17 – Curva de secagem típica de um material de construção poroso	34
Figura 3.18 – Curva de teor de água e representação do Índice de Secagem (IS).....	34
Figura 3.19 – Curvas de secagem e respectivos parâmetros Taxa de Secagem e Coeficiente de Secagem.....	35
Figura 3.20 – Preparação dos provetes para o ensaio de porosidade aberta e massa volúmica aparente.....	36
Figura 3.21 – Ensaio de determinação da porosidade aberta e massa volúmica aparente	36
Figura 3.22 – Balança adaptada para o ensaio de Pab e MVap.....	37
Figura 3.23 – Ensaio de condutibilidade térmica.....	38
Figura 3.24 – Ensaio de resistência aos sulfatos	40
Figura 3.25 – Porosímetro de mercúrio Autopore IV	40

Figura 3.26 – Aspecto das amostras para realização de determinação de porosimetria de mercúrio.....	41
Figura 3.27 – Porta de baixa pressão e de alta pressão de intrusão de mercúrio.....	42
Figura 3.28 – Fragmentação de uma amostra de argamassa	43
Figura 3.29 – Colocação da amostra em pó no porta-amostras e difractómetro Philips PW3710 utilizado no ensaio.....	43
Figura 3.30 – Preparação da amostra para o ensaio TG-DTG	44
Figura 3.31 – Termobalança Setaram TGA92 utilizada no ensaio TG-DTG	45
Figura 4.1 – Módulo de elasticidade dinâmico (Ed) de todas as argamassas estudadas.....	47
Figura 4.2 – Módulo de elasticidade dinâmico (Ed) das argamassas de cal aérea	48
Figura 4.3 – Módulo de elasticidade dinâmico (Ed) das argamassas de cal hidráulica natural	49
Figura 4.4 – Influência do tipo de cura nas argamassas NHL relativamente ao Ed	50
Figura 4.5 – Influência do tempo de amassadura nas argamassas NHL, relativamente ao Ed	50
Figura 4.6 – Influência da substituição parcial de NHL por metacaulino nas argamassas, relativamente ao Ed	50
Figura 4.7 – Resistência à tracção por flexão e à compressão de todas as argamassas estudadas	51
Figura 4.8 – Resistência à tracção por flexão e à compressão das argamassas de cal aérea.....	52
Figura 4.9 – Resistência à tracção por flexão e à compressão das argamassas de cal hidráulica natural.....	52
Figura 4.10 – Influência do tipo de cura nas argamassas NHL relativamente à Rt e Rc	53
Figura 4.11 – Influência do tempo de amassadura nas argamassas NHL, relativamente à Rt e Rc....	54
Figura 4.12 – Influência da substituição parcial de NHL por metacaulino nas argamassas, relativamente à Rt e Rc	54
Figura 4.13 – Curva de absorção capilar de todas as argamassas estudadas	55
Figura 4.14 – VA e CC de todas as argamassas estudadas	56
Figura 4.15 – Valor assintótico e coeficiente de capilaridade das argamassas de cal aérea.....	56
Figura 4.16 – Troço inicial das curvas de absorção capilar das argamassas de cal aérea.....	57
Figura 4.17 – Valor assintótico e coeficiente de capilaridade das argamassas de cal hidráulica natural.....	57
Figura 4.18 – Troço inicial das curvas de absorção capilar das argamassas de cal hidráulica natural.....	58

Figura 4.19 – Influência do teor de metacaulino nas argamassas NHL, relativamente à absorção de água por capilaridade	58
Figura 4.20 – Curvas de secagem de todas as argamassas estudadas	59
Figura 4.21 – Índice de Secagem e Taxa de Secagem de todas as argamassas estudadas	59
Figura 4.22 – Troço inicial das curvas de secagem das argamassas de cal aérea	60
Figura 4.23 – Índice de Secagem e Taxa de Secagem das argamassas de cal aérea	61
Figura 4.24– Troço inicial das curvas de secagem das argamassas de cal hidráulica natural	61
Figura 4.25 – Índice de Secagem e Taxa de Secagem das argamassas de cal hidráulica natural.....	62
Figura 4.26 – Influência do tipo de cura nas argamassas NHL, relativamente à secagem.....	62
Figura 4.27 – Influência do tempo de amassadura nas argamassas NHL, relativamente à secagem	63
Figura 4.28 – Influência do teor de metacaulino nas argamassas NHL, relativamente à secagem	63
Figura 4.29 – Porosidade aberta e massa volúmica aparente de todas as argamassas estudadas	64
Figura 4.30 – Porosidade aberta e massa volúmica aparente das argamassas de cal aérea	65
Figura 4.31 – Porosidade aberta e massa volúmica aparente das argamassas de cal hidráulica natural.....	65
Figura 4.32 – Condutibilidade térmica (comparativa) das argamassas de cal aérea.....	66
Figura 4.33 – Condutibilidade térmica (comparativa) das argamassas de cal hidráulica natural	67
Figura 4.34 – Variação de massa (%) das argamassas estudadas, por contaminação de sulfatos.....	68
Figura 4.35 – Variação de massa das argamassas aos 20 ciclos do ensaio de resistência aos sulfatos	68
Figura 4.36 – Variação de massa dos provetes da argamassa NHL.3_Lm_Hc_10Mk, no ensaio de resistência aos sulfatos	69
Figura 4.37 – Variação de massa (%) das argamassas de cal aérea, nos ensaios de resistência aos sulfatos.....	69
Figura 4.38 – Aspecto dos provetes da argamassa CL.1_Mk30-2 ao fim de 7 ciclos.....	70
Figura 4.39 – Aspecto dos provetes da argamassa CL.1_Mk30-2 ao fim de 10 ciclos.....	70
Figura 4.40 – Variação de massa (%) das argamassas NHL, nos ensaios de resistência aos sulfatos	71
Figura 4.41– Aspecto dos provetes da argamassa NHL.3_Sm_Sc ao fim de 11 ciclos	72
Figura 4.42– Aspecto dos provetes da argamassa NHL.3_Sm_Sc ao fim de 20 ciclos	72
Figura 4.43 – Curvas de intrusão cumulativa de mercúrio das argamassas de cal aérea	73

Figura 4.44 – Curvas de intrusão incremental de mercúrio das argamassas de cal aérea.....	73
Figura 4.45 – Percentagem de mercúrio introduzido nas duas primeiras intrusões	74
Figura 4.46 – Porosimetria de mercúrio das argamassas com cal aérea com traço 1:3.....	74
Figura 4.47 – Porosimetria de mercúrio das argamassas com cal aérea com traço 1:2.....	75
Figura 4.48 – Porosimetria de mercúrio das argamassas com cal aérea com traço 1:1.....	76
Figura 4.49 – Difractogramas das argamassas de cal aérea com traços 1:1, 1:2 e 1:3 e 0% de Mk, aos 180 dias de idade.....	77
Figura 4.50 – Curvas DTG das argamassas de cal aérea com traço 1:1, 1:2 e 1:3 e 0% de Mk, com 180 dias de idade	77
Figura 4.51 – Difractogramas das argamassas de cal aérea com traço 1:3 e 0, 30 e 50% de Mk, com 180 dias de idade	78
Figura 4.52 – Curvas DTG das argamassas de cal aérea com traço 1:3 e 0, 30 e 50% de Mk, com 180 dias de idade	79
Figura 4.53 – Difractogramas das argamassas de cal aérea com traço 1:1 e 0, 30 e 50% de Mk, com 180 dias de idade	79
Figura 4.54 – Curvas DTG das argamassas de cal aérea com traço 1:1 e 0, 30 e 50% de Mk, com 180 dias de idade	80
Figura 4.55 – Difractogramas das argamassas de cal aérea com traço 1:1, 1:2 e 1:3 e 30% de Mk, com 180 dias de idade.....	80
Figura 4.56 – Curvas DTG das argamassas de cal aérea com traço 1:1, 1:2 e 1:3 e 30% de Mk, com 180 dias de idade	81
Figura 4.57 – Difractogramas das argamassas de cal aérea com traço 1:1, 1:2 e 1:3 e 50% de Mk, com 180 dias de idade.....	81
Figura 4.58 – Curvas DTG das argamassas de cal aérea com traço 1:1, 1:2 e 1:3 e 50% de Mk, com 180 dias de idade	82
Figura 4.59 – Difractogramas das argamassas NHL com 10% de Mk, avaliando a influência do tempo de amassadura aos 180 dias	83
Figura 4.60 – Curvas DTG das argamassas NHL com 0 e 10% de Mk, avaliando a influência do tempo de amassadura aos 180 dias	83
Figura 4.61 – Difractograma das argamassas NHL sem Mk, avaliando a influência do tipo de cura aos 180 dias.....	84
Figura 4.62 – Difractogramas das argamassas NHL com 10% de Mk, avaliando a influência do tipo de cura aos 180 dias	84

Figura 4.63 – Curvas DTG das argamassas NHL com 0 e 10% de Mk, avaliando a influência do tipo de cura aos 180 dias	85
Figura 4.64 – Difractogramas das argamassas NHL, avaliando a influência do teor de Mk aos 180 dias	85
Figura 4.65 – Curvas DTG das argamassas NHL, avaliando a influência do teor de Mk aos 180 dias.....	86
Figura 5.1 – Relação entre resistência à tracção e módulo de elasticidade dinâmico das argamassas CL	89
Figura 5.2 – Quociente entre resistência à tracção e à compressão (deformabilidade) das argamassas de CL	89
Figura 5.3 – Relação entre a resistência à tracção e a variação de massa aos 20 ciclos de ataque por sulfatos.....	90
Figura 5.4 – Comparação entre os resultados de porosidade aberta obtidos pelo método de pesagens hidrostáticas (Pab,ph) e por intrusão de mercúrio (Pab,im)	91
Figura 5.5 – Relação entre resistência à compressão e a quantidade de poros finos.....	91
Figura 5.6 – Relação entre o teor de carbonatos e a quantidade de poros de grandes dimensões.....	92
Figura 5.7 – Relação entre a absorção capilar (VA) e a quantidade de poros finos.....	92
Figura 5.8 – Relação entre a velocidade de absorção inicial (CC) e a quantidade de poros de grandes dimensões	93
Figura 5.9 – Relação entre a absorção capilar (VA) e o Índice de Secagem das argamassas CL	93
Figura 5.10 – Evolução com a idade do módulo de elasticidade dinâmico das argamassas de CL.....	94
Figura 5.11 – Evolução com a idade da resistência à tracção das argamassas de CL	94
Figura 5.12 – Evolução com a idade da resistência à compressão das argamassas de CL.....	95
Figura 5.13 – Difractogramas das argamassas de cal aérea com traço 1:1 e 0% de Mk, aos 28, 90 e 180 dias de idade	96
Figura 5.14 – Curvas DTG das argamassas de cal aérea com traço 1:1 e 0% de Mk, aos 28, 90 e 180 dias de idade.....	96
Figura 5.15 – Difractogramas das argamassas de cal aérea com traço 1:1 e 30% de Mk, aos 28, 90 e 180 dias de idade	97
Figura 5.16 – Curvas DTG das argamassas de cal aérea com traço 1:1 e 30% de Mk, aos 28, 90 e 180 dias de idade	97
Figura 5.17 – Difractogramas das argamassas de cal aérea com traço 1:2 e 50% de Mk, aos 28, 90 e 180 dias de idade	98

Figura 5.18 – Evolução com a idade da absorção capilar das argamassas de CL	99
Figura 5.19 – Evolução com a idade do índice de secagem das argamassas de CL.....	100
Figura 5.20 – Relação entre resistência à tracção e módulo de elasticidade dinâmico das argamassas NHL	102
Figura 5.21 – Quociente entre resistência à tracção e à compressão (deformabilidade) e relação com o módulo de elasticidade dinâmico das argamassas de NHL	103
Figura 5.22 – Relação entre a absorção capilar (VA) e o Índice de Secagem das argamassas NHL	103
Figura 5.23 – Relação entre a resistência à tracção e a variação de massa aos 20 ciclos de ataque por sulfatos (Δm 20c [%]) das argamassas NHL	104
Figura 5.24 – Evolução com a idade do módulo de elasticidade dinâmico das argamassas de NHL	105
Figura 5.25 – Evolução com a idade da resistência à tracção das argamassas de NHL.....	105
Figura 5.26 – Evolução com a idade da resistência à compressão das argamassas de NHL	106
Figura 5.27 – Difractogramas das argamassas NHL, avaliando a influência do teor de Mk aos 28 dias.....	106
Figura 5.28 – Curvas DTG das argamassas NHL sem Mk, avaliando a sua evolução com a idade..	107
Figura 5.29 – Difractograma das argamassas NHL com 5% de Mk, avaliando a sua evolução com a idade	108
Figura 5.30 – Curvas DTG das argamassas NHL com 5% de Mk, avaliando a sua evolução com a idade.....	108
Figura 5.31 – Difractograma das argamassas NHL com 10% de Mk, avaliando a sua evolução com a idade	109
Figura 5.32 – Curvas DTG das argamassas NHL com 10% de Mk, avaliando a sua evolução com a idade.....	109
Figura 5.33 – Evolução com a idade da absorção capilar das argamassas de NHL	110
Figura 5.34 – Evolução com a idade do índice de secagem das argamassas de NHL	110

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Exigências funcionais e características necessárias de cada tipo de argamassa	11
Quadro 2.2 – Requisitos estabelecidos para as características, aos 90 dias, das argamassas de revestimento para edifícios antigos.....	13
Quadro 2.3 – Classificação para as propriedades de argamassas no estado endurecido	14
Quadro 3.1 – Baridade dos constituintes das argamassas.....	16
Quadro 3.2 – Composição química da cal aérea (em % de massa)	17
Quadro 3.3 – Requisitos químicos da cal cálcica (valores característicos)	18
Quadro 3.4 – Composição química do metacaulino (em % de massa).....	18
Quadro 3.5 – Traços volumétricos e ponderais, relações água/ligante e espalhamento médio das argamassas de cal aérea	20
Quadro 3.6 – Traços volumétricos e ponderais, relações água/ligante e espalhamento médio das argamassas de cal hidráulica natural.....	21
Quadro 3.7 – Resumo das características das argamassas ensaiadas.....	24
Quadro 4.1 – Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade das argamassas CL e NHL	55
Quadro 5.1 – Resultados das argamassas de cal aérea: módulo de elasticidade dinâmico, resistência à tracção por flexão e à compressão.....	87
Quadro 5.2 – Resultados das argamassas de cal aérea: coeficiente de capilaridade, valor assintótico, índice taxa e coeficiente de secagem	88
Quadro 5.3 – Resultados das argamassas de cal aérea: porosidade aberta, massa volúm. aparente, condutibilidade térmica e variação de massa aos 20 ciclos de ataque por sulfatos	88
Quadro 5.4 – Índices de secagem de argamassas de CL considerando o tempo final do estudo realizado por Branco (a publicar em 2012)	100
Quadro 5.5 – Resultados das argamassas de cal hidráulica natural: módulo de elasticidade dinâmico, resistência à tracção por flexão e à compressão	101
Quadro 5.6 – Resultados das argamassas de cal hidráulica natural: coeficiente de capilaridade, valor assintótico, índice taxa e coeficiente de secagem	101
Quadro 5.7 – Resultados das argamassas de cal hidráulica natural: porosidade aberta, massa volúm. aparente, condutibilidade térmica e variação de massa aos 20 ciclos de ataque por sulfatos.....	102

Quadro 5.8 – Índices de secagem de argamassas de NHL considerando o tempo final do estudo realizado por Carneiro (2012)	110
Quadro 5.9 – Requisitos relativos à Rc e capilaridade de acordo com a classificação das argamassas	111
Quadro 5.10 – Classificação das argamassas de cal aérea segundo o seu tipo de utilização	111
Quadro 5.11 – Classificação das argamassas de cal hidráulica natural segundo o seu tipo de utilização.....	112
Quadro 5.12 – Resistência à compressão da cal hidráulica natural (valores característicos).....	112
Quadro 5.13 – Características das argamassas de cal aérea aos 90 dias	113
Quadro 5.14 – Características das argamassas de cal hidráulica natural aos 90 dias.....	113

SIMBOLOGIA

- **Abreviaturas**

CEN – Comité Européen de Normalisation

DEC – Departamento de Engenharia Civil

EN – European Norm

FCT-LIMECONTECH – Projecto LIMECONTECH financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia

FTC-MEC – Fundação para a Ciência e a Tecnologia do Ministério da Educação e Ciência

FTC-METACAL – projecto METACAL financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia

FCT-UNL – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

IPQ – Instituto Português da Qualidade, I.P.

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

Mk – Metacaulino

NP – Norma Portuguesa

SCH – Secção de Construção e Hidráulica

- **Ensaios e determinações**

CC – Coeficiente de Capilaridade

CS – Coeficiente de Secagem

DP – Desvio Padrão

DRX – Difracção de Raios X

Ed – Módulo de elasticidade dinâmico

HR – Humidade Relativa

IS – Índice de Secagem

MVap – Massa Volúmica aparente

Pab – Porosidade aberta

Rc – Resistência à compressão

Rt – Resistência à tracção (por flexão)

TG-DTG – Análise Termogravimétrica e análise Termogravimétrica Diferencial

TS – Taxa de Secagem

VA – Valor Assintótico (absorção capilar)

Wt – Teor de água

Δm_{20c} – Variação de massa ao fim de 20 ciclos de imersão/secagem, em solução com sulfatos

λ – Condutibilidade térmica

- **Argamassas de cal aérea**

CL – Cal aérea hidratada cálcica (Calcium Lime)

CL.3 – Argamassa de cal aérea com traço volumétrico 1:3

CL.3-2 – Reformulação da argamassa CL.3 com diminuição do teor de água

CL.3_Mk30 – Argamassa de cal aérea com traço volumétrico 1:3, com substituição de 30% da massa de cal por massa equivalente de metacaulino

CL.3_Mk30-2 – Reformulação da argamassa CL.3_Mk30 com aumento do teor de água

CL.3_Mk50 – Argamassa de cal aérea com traço volumétrico 1:3, com substituição de 50% da massa de cal por massa equivalente de metacaulino

CL.3_Mk50-2 – Reformulação da argamassa CL.3_Mk50 com aumento do teor de água

CL.2 – Argamassa de cal aérea com traço volumétrico 1:2

CL.2_Mk30 – Idem, com substituição de 30% da massa de cal por massa equivalente de metacaulino

CL.2_Mk50 – Idem, com substituição de 50% da massa de cal por massa equivalente de metacaulino

CL.1 – Argamassa de cal aérea com traço volumétrico 1:1

CL.1-2 – Reformulação da argamassa CL.1 com aumento do teor de água

CL.1_Mk30 – Argamassa de cal aérea com traço volumétrico 1:1, com substituição de 30% da massa de cal por massa equivalente de metacaulino

CL.1_Mk30-2 – Reformulação da argamassa CL.1_Mk30 com aumento do teor de água

CL.1_Mk50 – Argamassa de cal aérea com traço volumétrico 1:1, com substituição de 50% da massa de cal por massa equivalente de metacaulino

- **Argamassas de cal hidráulica natural**

Lm – Amassadura mais prolongada (Long mixture)

Sm – Amassadura durante o período de tempo definido na norma (*Standard mixture*)

Hc – Cura húmida (Humid cure)

Sc – Cura definida na norma (*Standard* cure)

NHL – Cal hidráulica natural (Natural Hydraulic Lime)

NHL.3_Lm_Hc – Argamassa de cal hidráulica natural com traço volumétrico 1:3, produzida com Lm e submetida a Hc

NHL.3_Sm_Sc – Idem, produzida com Sm e submetida a Sc

NHL.3_Sm_Hc – Idem, produzida com Sm e submetida a Hc

NHL.3_Sm_Hc_10Mk – Idem, produzida com Sm e submetida a Hc, com substituição de 10% da massa de cal por massa equivalente de metacaulino

NHL.3_Sm_Sc_10Mk – Idem, produzida com Sm e submetida a Sc, com substituição de 10% da massa de cal por massa equivalente de metacaulino

NHL.3_Lm_Hc_5Mk – Idem, produzida com Lm e submetida a Hc, com substituição de 5% da massa de cal por massa equivalente de metacaulino

NHL.3_Lm_Hc_10Mk – Idem, com substituição de 10% da massa de cal por massa equivalente de metacaulino

NHL.3_Lm_Hc_20Mk – Idem, com substituição de 20% da massa de cal por massa equivalente de metacaulino

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento

Construir com cal é uma técnica antiga. Séculos de experiência em construção provam que a cal ainda é um material forte e duradouro nos dias de hoje. Ainda assim uma variedade de novos materiais cimentícios foi introduzida no mercado e estes mudaram a forma de pensar e executar a construção. O conhecimento dos materiais como a cal diminuiu ao longo dos anos, o que leva a problemas em obras de conservação nos dias de hoje [SWOLFS *et al.*, 2010].

O conceito de argamassas de substituição integra a abordagem moderna de conservação do património edificado, onde estas desempenham um papel importante. Apesar deste conceito não ser novo, existe na actualidade uma grande variedade de materiais e produtos, criando novas oportunidades mas também desafios de difícil resolução, que devem ser analisados cientificamente [HENRIQUES *et al.*, 2006, HENRIQUES *et al.*, 2008].

A escolha adequada dos materiais, formulação e condições de cura das argamassas de substituição tornou-se crucial no sucesso das construções. Estas argamassas devem ser avaliadas segundo uma abordagem exigencial, garantindo os requisitos funcionais e estéticos, satisfazendo o princípio da compatibilidade, mantendo a integridade e durabilidade do edifício. A compatibilidade deve ser assegurada a nível de características mecânicas, físicas e químicas [HENRIQUES *et al.*, 2006; VEIGA, 2003].

As argamassas de cal aérea apresentam, de um modo geral, melhor compatibilidade com os edifícios antigos; no entanto a sua presa lenta dificulta ou impossibilita mesmo por vezes a sua aplicação nalguns casos. Juntando a isto, estas argamassas têm apresentado alguns problemas de durabilidade, principalmente quando expostas à chuva e ao gelo, apesar de chegarem aos nossos dias argamassas com milhares de anos que apresentam resistência e coesão superiores a muitas argamassas recentes [FARIA, 2004; VEIGA, 2010].

As cais hidráulicas naturais diferem das cais aéreas por endurecerem quando em contacto – ou mesmo imersas – com a água, enquanto no caso das cais aéreas não existe presa se não existir contacto com o dióxido de carbono. A nova versão da norma das cais de construção, NP EN 459-1:2011 [IPQ, 2011], veio redefinir a classificação das cais com comportamento hidráulico, obrigando a possíveis reformulações do processo de fabricação por parte da indústria [FARIA *et al.*, 2012a].

Pelo menos desde a era Grega, existem registos da utilização de pozolanas naturais. O seu teor de sílica e alumina amorfa e a superfície específica são factores que influenciam a reacção pozolânica, permitindo aumentar a resistência e durabilidade das argamassas de cal. A utilização de pozolanas em argamassas tem vindo a ser reconhecida pela introdução de melhorias técnicas, económicas e ambientais. As próprias pozolanas para utilização em argamassas e betões já são objecto de normalização em Portugal – NP 4220: 2010 [IPQ, 2010]. Em argamassas de cal aérea, a adição de pozolanas pode conferir-lhes características hidráulicas, possibilitando a sua utilização em situações em que se pretendam endurecimentos rápidos em ambientes com elevada humidade relativa ou com fraco contacto com o dióxido de carbono [FARIA, 2004; VELOSA, 2006]

Têm sido usados dois tipos de pozolanas no passado: naturais e artificiais. Entre estas últimas está o metacaulino, que é obtido através da calcinação de argilas caulínicas, disponíveis no norte e centro de Portugal. O seu baixo impacto ambiental, devido ao baixo consumo de energia durante a produção, comparativamente ao da produção de ligantes, ou a possibilidade da sua obtenção a partir de caulinos provenientes de resíduos, tornam vantajosa a utilização das pozolanas [VELOSA *et al.*, 2009; FARIA *et al.*, 2012a]

1.2. Objectivos e metodologia

Esta dissertação tem como objectivo geral caracterizar as propriedades mecânicas, físicas e químicas de dois tipos de argamassas, utilizando dois ligantes distintos, no seu estado endurecido, aos 180 dias de idade, com vista a avaliar a sua adequabilidade e possibilidade de aplicação.

Para além do tipo de cal, o principal parâmetro a avaliar foi a influência do teor de ligante, substituído parcialmente por uma pozolana artificial, no caso um metacaulino. Foram avaliadas diferentes percentagens de substituição (% em massa) nas diferentes argamassas; nas argamassas de cal aérea foram utilizados teores de substituição de 0%, 30% e 50%, enquanto nas argamassas de cal hidráulica os teores de substituição foram de 0%, 5%, 10% e 20%.

Nas argamassas de cal aérea foram ainda avaliadas as características de três traços volumétricos distintos – 1:1, 1:2 e 1:3 – e todas as argamassas foram sujeitas a cura húmida ($95 \pm 5\%$ de humidade relativa, HR). As argamassas de cal hidráulica natural NHL5 foram todas realizadas com o mesmo traço volumétrico de 1:3, sendo avaliada a influência do tempo de amassadura, bem como a influência da cura húmida face a uma cura segundo a norma EN 1015-11 [CEN, 1999b] ($65 \pm 5\%$ de HR).

Os ensaios realizados no presente estudo foram de natureza mecânica, física e química/mineralógica. Com os resultados obtidos na campanha experimental pretende-se constatar que tipo de formulação oferece as características mais benéficas de acordo com as exigências funcionais pretendidas para cada aplicação.

O presente trabalho surge no seguimento de dois estudos distintos efectuados por Carneiro (2012) e Branco (a publicar em 2013) foram caracterizadas argamassas de cal hidráulica natural NHL5 e de cal aérea hidratada, através dos mesmos ensaios, realizados aos 28 e 90 dias de idade. Estes estudos, inseridos nos projectos METACAL e LIMECONTECH, financiados pela Fundação para a Ciência e Tecnologia, pretendem desenvolver, caracterizar e otimizar argamassas compatíveis, com base em cal e metacaulino, para a conservação, reparação e reabilitação de património edificado e contribuir para a conservação de revestimentos de paredes com carácter histórico [ERACAREERS, s.d.].

1.3. Estrutura do trabalho

A dissertação que se apresenta está organizada em seis capítulos, sendo o presente o capítulo introdutório.

O segundo capítulo é sobretudo teórico, onde se apresenta o estado do conhecimento, baseado numa pesquisa bibliográfica sobre alguns dos temas relacionados com o presente estudo. Em formato de enquadramento e justificação é abordada a situação da construção civil em Portugal. São ainda abordadas as exigências funcionais das argamassas de substituição e algum contexto teórico relacionado com algumas das matérias-primas utilizadas.

No capítulo três é descrito o desenvolvimento experimental, onde estão identificados os materiais e técnicas que foram utilizadas nos estudos anteriores para a execução das argamassas e os procedimentos de ensaios realizados para a sua caracterização no estado endurecido.

Segue-se, no capítulo quarto, a apresentação e análise dos resultados obtidos na campanha experimental. Os resultados foram avaliados, tendo-se realizado comparações entre as várias argamassas.

No quinto capítulo procedeu-se a uma generalização dos resultados, onde se discutem e relacionam as principais características das argamassas estudadas. Foram ainda efectuadas comparações de valores com outros estudos semelhantes, de forma a interpretar a sua evolução com a idade, e com bibliografia analisada.

Finalmente, no sexto capítulo é apresentada uma síntese das conclusões retiradas com o desenvolver do trabalho e são apresentadas algumas propostas para desenvolvimentos futuros, nesta área em estudo.

As referências bibliográficas e os anexos são apresentados no fim da presente dissertação, em capítulos independentes.

2. ESTADO DO CONHECIMENTO

2.1. Estado actual e perspectiva futura da construção em Portugal: a importância de conservar e reabilitar

A economia portuguesa atravessa uma das maiores recessões das últimas décadas. O sector da construção civil tem sido dos mais afectados, como se constata por toda a imprensa. Notícias como: “Sector da construção acentua queda para quase 20% em Junho” [JN, 2012] e “Desapareceram 29 construtoras por dia até Junho” [ECONÓMICO, 2012] reflectem diariamente o estado do sector na actualidade.

Encontrar a melhor opção estratégica que permita o crescimento da economia e pelo menos a estabilização do sector da construção, de forma sustentável a médio/longo prazo, será um grande desafio.

Ao construir – entenda-se construção nova – esgota-se, quase irreversivelmente uma parcela de um bem precioso: o espaço. Apesar do dever de conservar estar consagrado na legislação nacional, em Portugal existe alguma falta de cultura de manutenção e reabilitação do património edificado, mesmo identificando a conservação e reabilitação do património como uma inquestionável prioridade e componente indispensável da política de desenvolvimento económico sustentável do país, da política das cidades e da política de habitação. O estado de conservação tanto do parque habitacional corrente como do património histórico e cultural é, na generalidade dos casos, manifestamente deficiente. Os casos de abandono, mau estado e degradação do edificado são uma realidade demasiado frequente [AECOPS, 2009].

A problemática da conservação e da reabilitação urbana é indubitavelmente uma questão central na abordagem do futuro da construção. O modelo de desenvolvimento dominante até à data, assente essencialmente na construção nova e na expansão dos centros habitacionais, encontra-se esgotado por ser insustentável do ponto de vista social, económico, ambiental e urbanístico. Para reforçar a capacidade de atracção do país é necessário apresentar, a quem o visita, centros urbanos bem conservados.

À data do Censos 2001 (uma vez que os resultados de 2011 ainda não se encontravam disponíveis à data da realização do presente estudo), cerca de 41% do total do parque edificado apresentava necessidades de reparação, sendo que dessa parcela 7,2% foram considerados como muito degradados e 12,6% necessitavam de grandes intervenções. Constatou-se ainda no mesmo estudo que 18% dos edifícios têm uma idade de construção de 65 anos ou mais, o que equivale, à data de hoje, a 75 anos ou mais. Em 2008 as necessidades de reabilitação nos edifícios habitacionais atingiram mais de 295 milhões de m² (isto é, cerca de 34% do parque habitacional). [AECOPS, 2009].

O mercado de reabilitação poderá tornar-se então num mercado emergente e afirmar-se, num futuro muito próximo, como o segmento mais dinâmico do sector da construção. Só em património edificado – residencial e não residencial – o potencial de reabilitação poderá ascender aos 100 mil milhões de euros, em valores de 2008 [AECOPS, 2009; AECOPS, 2011].

Segundo as mais recentes *Estatísticas da Construção e Habitação* [INE, 2012], apesar da grande predominância de construções novas (75,1% do total de construções), denota-se que a reabilitação na edificação é uma aposta crescente no sector da construção. Este facto pode resultar de algum modo, do reconhecimento de que existe uma saturação do mercado de novas habitações, centrando-se agora as empresas de construção no âmbito da reabilitação do edificado.

Entre 2005 e 2011 os licenciamentos de novas construções para habitação familiar viram o seu peso no total diminuir 17,2 pontos percentuais (passando de 64,4% para 47,2%), evidenciando o peso crescente da reabilitação do edificado. Face ao valor registado em 2005, o número de edifícios licenciados em construções novas para habitação familiar diminuiu 64% [INE, 2012].

Os municípios e outras entidades detentoras de habitação social executaram obras de conservação em 3 000 edifícios (12%) e reabilitaram 9 073 fogos (7,7%). O parque de habitação social totalizou uma despesa de 70 milhões de euros (84% com obras de conservação e reabilitação).

Em resultado do decréscimo acentuado das construções novas (Figura 2.1) tem-se verificado uma crescente importância relativa das reabilitações face ao total de obras concluídas. O número de edifícios reabilitados aumentou 3,1% em 2011 [INE, 2012].

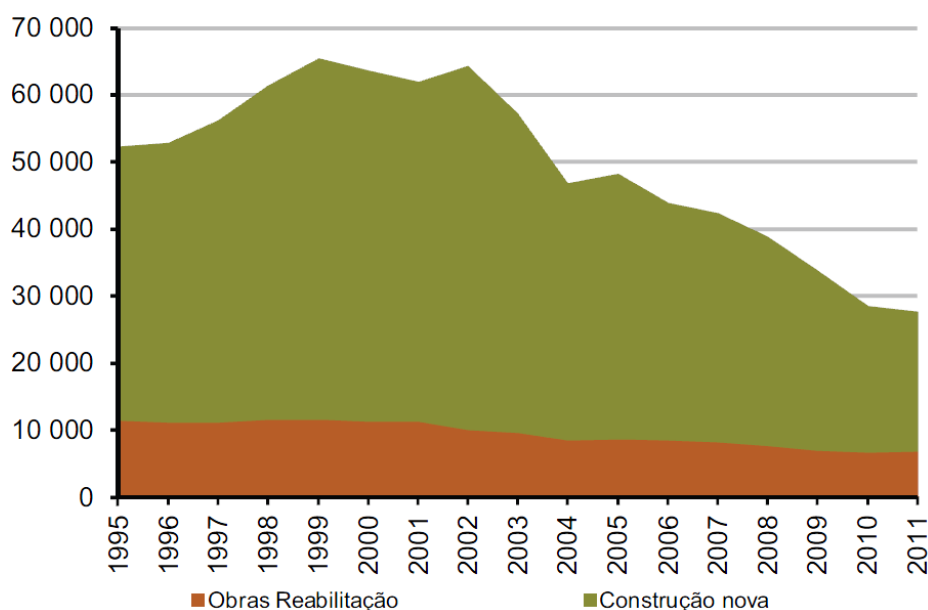


Figura 2.1 – Reabilitações do edificado e construções novas em Portugal, entre 1995-2011 [INE, 2012]

Considera-se essencial apostar de forma clara na conservação e reabilitação dos edifícios, adoptando-se medidas de real incentivo a estas actividades. *“A reabilitação urbana é nos dias de hoje um tema imprescindível quer se fale de conservação e defesa do património, de desenvolvimento sustentado, de ordenamento do território, de qualificação ambiental ou de coesão social e constitui um instrumento incontornável para a qualificação e o desenvolvimento das cidades”* [AECOPS, 2009].

“A capacidade de concretização do desígnio da reabilitação dependerá de uma verdadeira vontade política que acompanhe a mobilização do sector privado, para o que é imprescindível a

implementação de medidas adequadas a uma efectiva dinamização desta actividade” [AECOPS, 2011].

Assimilando essa importância, a Câmara Municipal de Lisboa (CML) assegura que a reabilitação urbana constitui uma prioridade de intervenção. Num documento intitulado *Estratégia de Reabilitação Urbana de Lisboa 2011-2024* [CML, 2011], a CML considera, entre outros, alguns factos essenciais para o desenvolvimento da estratégia:

- Lisboa tem sofrido um acentuado decréscimo populacional nas últimas décadas. Só na década de noventa o município viu a sua população reduzida em 15%.
- O elevado estado de degradação do edificado não é compaginável com uma cidade coesa, amigável, acolhedora e competitiva. Toda a Cidade consolidada carece de conservação ou reabilitação.
- A realização periódica de obras de conservação é condição indispensável para, a prazo, reduzir o número de edifícios que necessitam de reabilitação profunda.
- É necessário estender os incentivos fiscais a todas as obras de conservação e reabilitação, independentemente da sua localização na cidade, para dar um novo impulso às obras no edificado particular.

No documento exprime-se a ideia de que chegou a altura de mudar, visto que nenhuma das estratégias ensaiadas – entenda-se investimento em construção nova – é sustentável a longo prazo. Entre outros, a estratégia de reabilitação urbana de Lisboa define como objectivos gerais: reabitar a cidade, aumentar a coesão social, rejuvenescer o centro de Lisboa; reocupar e reutilizar o edificado existente; dar prioridade à conservação periódica do edificado; reabilitar o edificado degradado; manter a memória da cidade, restaurar o património histórico, arquitectónico e paisagístico de Lisboa [CML, 2011].

“A realização do volume de trabalhos de reabilitação estimados irá gerar impactos muito positivos na economia, nem sempre quantificáveis, dada a sua natureza e complexidade. Este aumento de produção terá ainda efeitos positivos no emprego” [AECOPS, 2009].

2.2. Matérias-primas

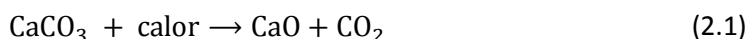
Na presente secção serão abordadas as principais características, assim como o processo de fabrico, das principais matérias-primas do tipo das utilizadas no estudo experimental.

2.2.1. Cal aérea

Segundo a norma NP EN 459-1 [IPQ, 2011] a cal aérea é constituída principalmente por óxido de cálcio, CaO ou hidróxido de cálcio, Ca(OH)₂. Este, na presença de humidade, endurece por reacção com o dióxido de carbono. A cal aérea pode ser de origem cálcica (CL) ou dolomítica (DL) e não endurece na água por não possuir propriedades hidráulicas.

As cais aéreas obtêm-se da cozedura de calcários (carbonato de cálcio, CaCO_3) com elevado grau de pureza, a uma temperatura que pode variar entre os 800°C a 1000°C, situando-se normalmente nos 900°C [MARGALHA, 2011].

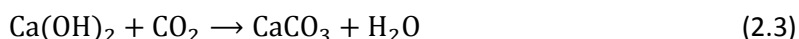
A aparência da rocha e do produto que se obtém após calcinação não são muito diferentes, mas as suas características transformam-se por completo. A calcinação (expressão 2.1) ocorre entre os 700°C e 850°C, que é a temperatura à qual a pressão do dióxido de carbono que sai do calcário é superior à pressão atmosférica. O carbonato de cálcio da rocha decompõe-se em dióxido de carbono (CO_2), que é libertado para o ar, e em óxido de cálcio (CaO), também designado por cal viva [FARIA, 2004].



O produto obtido pela cozedura dos calcários designa-se por cal viva, que é sobretudo óxido de cálcio, produto este muito instável que necessita de ser hidratado. Esta hidratação (ou extinção) (expressão 2.2) desenvolve-se por reacção do óxido de cálcio com a água, fornece a cal apagada (ou hidratada ou extinta), que é sobretudo hidróxido de cálcio – Ca(OH)_2 . A hidratação pode desenvolver-se por imersão ou aspersão com água [FARIA, 2004, COUTINHO, 2006].



O endurecimento da cal aérea hidratada faz-se em duas fases: numa primeira fase dá-se a evaporação da humidade em excesso; na segunda fase, a fase de carbonatação, dá-se uma reacção química ao ar, em que o hidróxido se reconverte em carbonato de cálcio por recombinação com o dióxido de carbono (CO_2) (expressão 2.3). A velocidade de carbonatação é afectada pelo teor em água, pela temperatura, concentração em CO_2 , humidade relativa ambiente e, em argamassas, pela sua espessura e pela permeabilidade ao vapor da camada [FARIA, 2004; COUTINHO, 2006].



O hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) é solúvel na água (1,3 g/l) e ainda mais na água salgada, sendo incapaz de ganhar preza ou endurecer nestas condições. Assim, as argamassas de cal aérea hidratada, sem outras adições, não podem ser usadas em obras hidráulicas nem marítimas [COUTINHO, 2006].

2.2.2. Cal hidráulica

As cais hidráulicas provêm de calcários impuros, com teores de argila entre os 5% e 20%. Quando tratados a temperaturas entre os 800°C – 1400°C (dependendo dos materiais, dos fabricantes e dos métodos de fabrico), além de se formar óxido de cálcio, há combinação da sílica e da alumina da argila com esse óxido de cálcio, em quantidades significativas. Alguns autores defendem que quanto maior for a temperatura (até 1400°C) e a percentagem de argila, mais completa

é a reacção, isto é, a quantidade de silicatos de cálcio ($\text{SiO}_2 \cdot 2\text{CaO}$) e aluminatos de cálcio ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaO}$) é maior [FARIA, 2004; COUTINHO, 2006].

A cal retirada do forno tem de ser extinta para eliminação da cal viva e para provocar a pulverização de toda a cal hidráulica. Na extinção deve apenas adicionar-se a água estritamente necessária para hidratar a cal viva, pois é a reacção expansiva desta que se aproveita para pulverizar os grãos que contêm os aluminatos e silicatos (e água em excesso iria hidratá-los) [FARIA, 2004].

O endurecimento da cal hidráulica compreende duas reacções. Na primeira reacção dá-se a hidratação dos silicatos e aluminatos de cálcio, em presença de humidade. Na segunda reacção dá-se a carbonatação da cal apagada, só ao ar e em presença do dióxido de carbono [COUTINHO, 2006].

Segundo a norma NP EN 459-1 [IPQ, 2011], são estabelecidas três subfamílias de cais hidráulicas: cal hidráulica natural (NHL), cal formulada (FL) e cal hidráulica (HL). A cal hidráulica natural, utilizada na parte experimental do presente estudo, é definida como uma cal com propriedades hidráulicas produzida pela queima de calcários mais ou menos argilosos ou siliciosos e redução a pó, por extinção, com ou sem moagem. As propriedades hidráulicas resultam exclusivamente da composição química especial da matéria-prima natural. São permitidos agentes de moagem até 0,1% mas não pode conter quaisquer outros aditivos.

A cal hidráulica natural é classificada em NHL 2, NHL 3,5 e NHL 5, de acordo com a sua resistência à compressão, determinada através da norma EN 459-2, aos 28 dias de idade [IPQ, 2011].

Portugal é um dos poucos países do mundo que produz cais hidráulicas naturais. A nova versão da norma NP EN 459-1 [IPQ, 2011] alterou o conceito de cal hidráulica natural, impedindo o uso de adições. Assim, muitas cais anteriormente fabricadas alteraram a sua classificação de NHL para HL ou FL. Esta situação obrigou alguns fabricantes, que pretendem continuar a disponibilizar no mercado cais hidráulicas naturais a reverem e alterarem os constituintes e a metodologia no processo de fabrico [FARIA *et al.*, 2012a].

2.2.3. Metacaulino

O metacaulino é uma pozolana artificial obtida por calcinação de argila caulinítica a uma temperatura entre 600 – 900°C. O tratamento térmico aos caulinos provoca a sua desidroxilação próximo dos 500°C, levando à rotura total ou parcial da estrutura cristalina, formando uma fase amorfa e altamente pozolânica. Após moagem, o composto formado é um pó claro, ligeiramente salmão, ultrafino, constituído por alumina e sílica amorfas – o metacaulino ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$, ou AS_2) [VELOSA, 2006; SABIR *et al.*, 2001; SAID-MANSOUR *et al.*, 2011].

Este material pode ser adicionado a argamassas de cal para melhorar as suas características mecânicas e o seu comportamento à água. Portugal é rico em caulinos, especialmente no norte e no centro do país, mas estes também podem ser obtidos como resíduo, por exemplo resultante da lavagem de areias cauliníticas [FARIA, 2004; VELOSA *et al.*, 2009].

Actualmente os metacaulinos são das pozolanas mais reactivas que se produzem. Vários estudos apresentam que a sua adição em argamassas de cal, em determinadas quantidades, alteram a sua microestrutura e melhoram a sua resistência mecânica e alguns parâmetros físicos, como o comportamento face à água [GAMEIRO *et al.*, 2012a; VEIGA, 2010; CARNEIRO, 2012; VELOSA *et al.*, 2009].

2.3. Argamassas de cal com pozolanas

A argamassa, produto resultante da mistura de um ligante com um agregado e água, pode ser definida como um material com propriedades aglutinantes no estado fresco. Às argamassas podem, contudo, adicionar-se mais alguns materiais que irão favorecer determinadas características. Neste âmbito, podem referir-se os adjuvantes e as adições, como é o caso das pozolanas [MARGALHA, 2011].

É afirmado que as pozolanas naturais foram primeiro aplicadas em argamassas de reboco pelos Gregos cerca de 1500 a.C. [VELOSA, 2006]. Seguiram-se os Romanos que usaram não só alguns solos vulcânicos como pozolanas naturais, que quando misturados com cal, eram excelentes para a produção de argamassas hidráulicas, mas também descobriram que cerâmica, tijolos e telhas britados e esmagados – que formaram as primeiras pozolanas artificiais – tinham efeito semelhante [RUSKULIS, 2005].

A especificidade das argamassas de cal aérea com pozolanas é a sua capacidade de realizar presa em imersão ou com fraco contacto com o dióxido de carbono. O incremento da resistência mecânica nas misturas de cal com pozolana, as suas propriedades hidráulicas e a sua boa resistência à água do mar, permitiram não só a construção de arcos e abóbadas mas também estruturas marítimas, termas, tanques e aquedutos. A durabilidade dos materiais é comprovada pelos muitos vestígios de estruturas Romanas ainda existentes [RUSKULIS, 2005; VELOSA *et al.*, 2005].

Segundo as normas EN 197-1 [CEN, 2000] e NP 4220 [IPQ, 2010], as pozolanas são substâncias de composição siliciosa ou sílico-aluminosa. Os materiais pozolânicos não endurecem, por si próprios, quando misturados com água, mas, quando finamente moídos e na presença desta, reagem à temperatura ambiente com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) dos ligantes minerais com que se combinam (cal aérea, cal hidráulica ou cimento, com quantidades decrescentes de Ca(OH)_2 livre) para formarem compostos hidratados de silicato e aluminato de cálcio. Estes compostos são similares àqueles que são formados no endurecimento dos ligantes hidráulicos [FARIA, 2004].

Quando a hidraulicidade é necessária em argamassas de cal e as sílicas activas e os aluminatos não estão presentes ou não se apresentam na quantidade suficiente, estes podem ser adicionados através de pozolanas, modificando as suas características em qualquer argamassa de cal. Dependendo do tipo de pozolana utilizada, a densidade e a resistência mecânica da argamassa podem aumentar e a sua porosidade diminuir [GIBBONS, 1997].

As pozolanas podem ser naturais, resultando da moagem de materiais de origem vulcânica, ou artificiais, caso das cinzas volantes industriais, de resíduos de vidro ou resíduos cerâmicos.

Podem ainda resultar de argilas especificamente sujeitas a tratamento térmico e moagem – caso dos metacaulinos [FARIA, 2012a].

2.4. Exigências funcionais das argamassas

Os diferentes tipos de utilizações que as argamassas podem ter numa acção de reparação, conservação ou reabilitação – ou mesmo construção nova – devem ser correctamente avaliados de modo a serem estabelecidos os requisitos adequados a cada situação. A escolha do tipo de argamassa utilizada deve ser efectuada segundo uma abordagem exigencial, baseada na função que a argamassa vai desempenhar: reboco exterior ou interior, assentamento ou refechamento de juntas [HENRIQUES *et al.*, 2006].

A escolha dos materiais a usar na realização de uma argamassa de substituição prende-se com critérios de compatibilidade física e química, critérios estéticos e de comportamento conjunto com os elementos pré-existent. Considera-se que estas argamassas devem contribuir para a preservação das alvenarias onde vão ser aplicadas e para a durabilidade do conjunto – tendo presente o conceito de reversibilidade – e não para a degradação dos elementos pré-existent, nem prejudicar a apresentação visual da arquitectura precedente [HENRIQUES *et al.*, 2006; VEIGA, 2003].

Uma argamassa de substituição inadequada pode provocar a degradação dos elementos onde é aplicada. Este fenómeno pode ocorrer por introdução de tensões excessivas num suporte eventualmente fraco e com deficiências de coesão; ainda no caso dos rebocos, através da tendência para reter a água no suporte, em lugar de facilitar a sua secagem; no caso das juntas de refechamento, através da alteração dos caminhos preferenciais de circulação da água (forma líquida ou vapor) das argamassas que eram primitivamente mais porosas e permeáveis, provocando a degradação da alvenaria por patologias relacionadas com a humidade; introduzindo saís onde podiam não existir (ou com tanta intensidade) antes [VEIGA, 2003].

As exigências funcionais e características necessárias que cada tipo de argamassa deve ter, podem ser resumidas através do Quadro 2.1.

Quadro 2.1 – Exigências funcionais e características necessárias de cada tipo de argamassa (baseado em [HENRIQUES *et al.*, 2006])

Função	Exigências funcionais	Característica necessária
Reboco exterior	Protecção contra a acção da água (forma líquida ou vapor)	Baixa absorção de água e elevada permeabilidade ao vapor de água
Reboco interior	Protecção contra acções mecânicas	Boa dureza superficial
Refechamento de juntas	Protecção contra a água / estabilidade estrutural	Baixa absorção de água, elevada permeabilidade ao vapor de água e expansibilidade

- Argamassas para rebocos exteriores

Os revestimentos exteriores são dos elementos mais expostos às acções climáticas. Revelam ainda um papel determinante na protecção de choques mecânicos e contaminação ambiental. Sabe-se também que os rebocos podem reforçar significativamente a resistência mecânica de alvenarias fracas, aspecto que não pode ser desprezado, já que nas paredes antigas as argamassas têm, em geral, funções estruturais. Pode-se afirmar então que os revestimentos exteriores assumem grande importância na conservação patrimonial [VEIGA, 2003].

De entre outras características necessárias nas argamassas para a protecção das alvenarias, destacam-se as seguintes [HENRIQUES *et al.*, 2006]:

- A absorção de água deve ser a menor possível, em termos de baixo coeficiente de capilaridade mas, sobretudo, de um valor assintótico pouco significativo.
- A água que se infiltra na argamassa deve poder sair, pelo que a permeabilidade ao vapor de água e a secagem são características fundamentais para o seu desempenho.
- Do ponto de vista das resistências mecânicas, as argamassas devem possuir duas características básicas: não devem ser mais fortes que as alvenarias, nem mais indeformáveis; sendo aplicadas em mais de que uma camada (para redução da possibilidade de entrada de água por fendilhação), as resistências mecânicas devem decrescer do interior para o exterior.
- A aderência da argamassa ao suporte é essencial para a protecção da alvenaria. Esta característica está relacionada directamente com a resistência mecânica.
- A resistência aos sais solúveis deve ser a maior possível pois estes são comuns em paredes antigas.

É importante referir que estas características são garantidas pelo revestimento no seu conjunto e não por uma única camada de argamassa.

No processo de selecção da composição e formulação de argamassas de substituição o método ideal seria caracterizar a argamassa pré-existente, reproduzi-la e aplicá-la segundo as técnicas tradicionais na época original.

Apesar das tecnologia actual permitir determinar a composição das argamassas antigas (que é diferente da do seu estado original, pelo menos em termos de proporções), os adjuvantes orgânicos e pozolânicos são difíceis de identificar e quantificar completamente, para além das técnicas de execução e aplicação utilizadas na época serem difíceis de determinar. Juntando a isto, os materiais, mesmo que designados pelo mesmo nome, podem não ser exactamente iguais (caso por exemplo de cal aérea de produção artesanal *versus* de produção industrial).

Assim sendo, o processo de selecção da composição de uma argamassa de reboco, que idealmente deve ser um processo iterativo, deve seguir os seguintes passos: preparação de uma argamassa de constituição semelhante a uma já testada do tipo e época do edifício em estudo; realização de ensaios para verificação dos requisitos mínimos; realização de correcções à formulação

experimentada, se necessário. O processo deve-se tornar mais minucioso e iterativo dependendo da importância histórica e cultural do edifício [FARIA, 2004; VEIGA, 2003].

Relativamente aos ensaios a realizar, estes podem-se separar segundo duas perspectivas diferentes [HENRIQUES *et al.*, 2008]:

- Características necessárias para garantia da protecção das paredes onde as argamassas estão aplicadas, determinadas através de:
 - resistências à compressão e à flexão;
 - tempo de presa;
 - aderência (em função de um determinado substrato existente ou de um padrão);
 - módulo de elasticidade (dinâmico ou estático);
 - absorção de água por capilaridade (em termos do coeficiente de capilaridade e do respectivo valor assintótico);
 - permeabilidade ao vapor de água (ou índice de secagem);
- Características necessárias para prevenção da degradação das argamassas, determinadas por:
 - resistência aos cloretos e/ou sulfatos;
 - resistência a ciclos gelo/degelo;
 - libertação de sais solúveis higroscópicos;
 - retracção e variações dimensionais (por acções de temperatura e humidade).

Algumas destas características são quantificadas em intervalos de valores, para a maioria das paredes de alvenaria mista nacionais, definidos através da acumulação de experiência [VEIGA, 2010]. Esses valores são compilados no Quadro 2.2.

Quadro 2.2 – Requisitos estabelecidos para as características, aos 90 dias, das argamassas de revestimento para edifícios antigos [VEIGA, 2010]

Função	Características mecânicas [MPa]			Comportamento à água
	Rt [MPa]	Rc [MPa]	Ed [MPa]	CC [kg/(m ² .min ^{1/2})]
Reboco exterior	0,2 – 0,7	0,4 – 2,5	2000 – 5000	1,0 < CC < 1,5
Reboco interior	0,2 – 0,7	0,4 – 2,5	2000 – 5000	-
Refechamento de juntas	0,4 – 0,8	0,6 – 3,0	3000 – 6000	1,0 < CC < 1,5

Com: Rt – Resistência à tracção; Rc – Resistência à compressão; Ed – Módulo de elasticidade dinâmico; CC – coeficiente de capilaridade.

A mesma investigadora [VEIGA, 2003] enumera outros parâmetros de avaliação das características necessárias para as argamassas, tais como a aderência, o comportamento à retração restringida, a espessura da camada de ar de difusão equivalente, ensaios com humidímetro e envelhecimento artificial acelerado. Os requisitos referentes a esses parâmetros não foram apresentados por não se encontrarem no âmbito do presente estudo.

Por sua vez, a norma EN 998-1 [CEN, 2010] define algumas gamas de valores, de determinadas propriedades, para argamassas de reboco a serem aplicadas em determinados tipos de obras e de aplicações específicas (Quadro 2.3).

Quadro 2.3 – Classificação para as propriedades de argamassas no estado endurecido [CEN, 2010]

Propriedades	Categoria	Valores
Gama de resistência à compressão aos 28 dias	CS I	0,4 a 2,5 MPa
	CS II	1,5 a 5,0 MPa
	CS III	3,5 a 7,5 MPa
	CS IV	≥ 6 MPa
Absorção de água por capilaridade	W 0	Não especificado
	W 1	$CC \leq 0,40 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{1/2})$
	W 2	$CC \leq 0,20 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{1/2})$

3. DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

Como já foi referido, a presente dissertação surge no seguimento de dois estudos distintos realizados anteriormente por Carneiro (2012) – que caracterizou argamassas com base em cal hidráulica natural NHL5 – e por Branco (a publicar em 2013) – que caracterizou argamassas com base em cal aérea. A preparação e caracterização das matérias-primas, a elaboração das argamassas, a realização dos provetes e a sua disposição nas salas de cura foram efectuadas pelos autores no âmbito dos respectivos estudos.

Os ensaios de caracterização das argamassas aos 180 dias de idade das argamassas foram realizados pelo autor da presente dissertação, seguindo um planeamento definido pela orientadora da mesma [FARIA, 2011]. O auxílio do Eng. Vítor Silva, da Secção de Construção e Hidráulica do DEC/FCT-UNL, bem como o de vários colegas que desenvolveram estudos semelhantes na área das argamassas em simultâneo, foi fundamental para a realização de todos os ensaios.

Todos os procedimentos experimentais decorreram nos Laboratórios de Construção do DEC/FCT-UNL, excepto os relativos à análise química e mineralógica.

3.1. Matérias-primas utilizadas

Na presente secção são descritas as características das matérias-primas utilizadas no presente estudo.

3.1.1. Agregado

Para a elaboração das diferentes argamassas foi utilizado como agregado uma mistura de três tipos de areias siliciosas lavadas e graduadas que foram adquiridas, de granulometria diferente: APAS 12, APAS20 e APAS30 (Figura 3.1), utilizadas numa proporção volumétrica respectiva de 1:1,5:1,5 em todas as argamassas ensaiadas. Estas areias têm vindo a ser utilizadas em todas as argamassas realizadas no âmbito dos projectos financiados pela Fundação para a Ciência e Tecnologia METACAL e LIMECONTECH, onde este estudo também se insere.



Figura 3.1 – Areias AREIOR utilizadas.

O estudo de Carneiro (2012) refere a realização de uma análise granulométrica por peneiração, baseada na norma NP EN 933-1, às areias e à mistura utilizada. A areia “APAS12 apresentava uma granulometria mais grossa, APAS20 era intermédia e APAS30 era composta por grãos mais finos” [CARNEIRO, 2012]. As curvas granulométricas resultantes do ensaio são apresentadas na Figura 3.2.

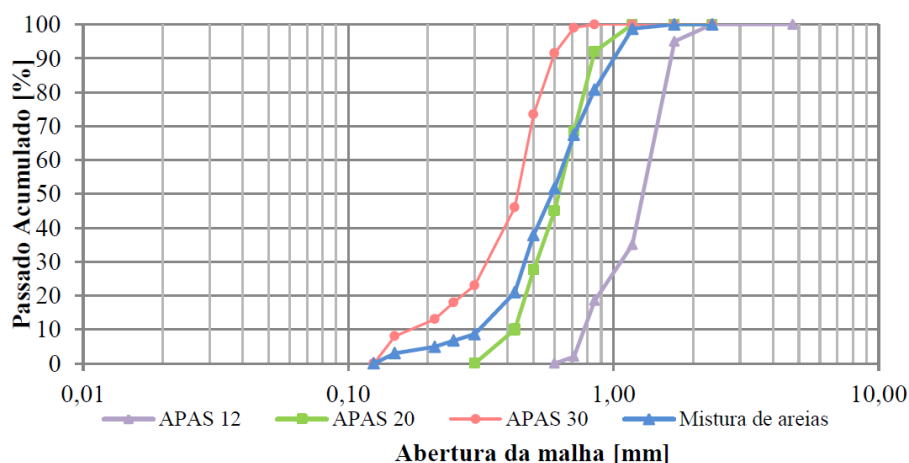


Figura 3.2 – Curvas granulométricas das areias e da respectiva mistura [CARNEIRO, 2012]

No mesmo estudo foi ainda determinada a baridade do agregado utilizado, segundo a norma NP EN 1097-3 [IPQ, 2000]. Este parâmetro permite determinar a massa de agregado seco que preenche um recipiente de capacidade conhecida. Determinada a baridade, é possível estabelecer a relação entre o traço volumétrico e o traço ponderal de uma mistura, permitindo quantificar a massa de material necessária. Os resultados obtidos apresentam-se no Quadro 3.1.

Quadro 3.1 – Baridade dos constituintes das argamassas. [BRANCO, 2013; CARNEIRO, 2012]

Baridade [g/cm ³]	
APAS 12	1,412
APAS 20	1,405
APAS 30	1,388
Mistura areias	1,463
Cal aérea	0,362
Cal hidráulica natural	0,821
Metacaulino	0,294

No anexo A.9 é apresentado o difractograma resultante da análise de DRX da mistura de areias.

3.1.2. Ligantes – cal aérea e cal hidráulica natural

No presente estudo foram caracterizadas dois tipos de argamassas diferentes, realizadas com dois tipos de ligantes. Foi utilizada uma cal aérea hidratada em pó, da marca Lusical,

classificada pelo fabricante (admite-se que segundo a norma NP EN 459-1 [IPQ, 2011]) como CL90 (identificada como CL), e uma cal hidráulica natural referenciada pela Secil Martingança como NHL5 (identificada ao longo deste trabalho como NHL), produzida e disponibilizada para este estudo em Outubro de 2011 (Figura 3.3). De referir que esta cal hidráulica natural tinha sido resultado de reformulação da antiga cal hidráulica produzida pela mesma empresa a qual, segundo a nova versão da norma e informação da empresa, se passou a classificar como HL5. Em informações recentes do produtor sabe-se que a cal hidráulica natural que foi fornecida para este estudo em Outubro de 2011 já sofreu posteriormente alguns ajustamentos de produção, nomeadamente face à entrada em vigor efectiva da norma EN 459-1 [IPQ, 2011] em Julho de 2012, pelo que a NHL5 actualmente produzida pela Secil já não corresponde exactamente ao lote utilizado neste estudo.



Figura 3.3 – Cal aérea e cal hidráulica NHL5 utilizadas

A baridade da cal aérea e da cal hidráulica natural são apresentadas no Quadro 3.1. A composição química da cal aérea e do metacaulino, utilizados no presente estudo, foi analisada pelo Dr. André Gameiro (em artigo submetido em 2012), bolseiro do projecto METACAL e colaborador nos ensaios experimentais realizados no LNEC (Quadro 3.2). No anexo A.9 é apresentado o difractograma resultante da análise de DRX de ambas as cals utilizadas no presente estudo.

Quadro 3.2 – Composição química da cal aérea (em % de massa) [GAMEIRO *et al.*, 2012b]

Material	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	L.O.I.*
Cal aérea	–	0,01	0,15	0,01	3,09	76,74	–	0,02	0,04	0,01	20,45

*Loss on ignition (perda ao fogo)

Desprezando a perda ao fogo, verifica-se que os compostos CaO + MgO representam 99,7% dos identificados (% em massa), representando o composto MgO 3,90%. Constata-se assim que a cal aérea utilizada no presente estudo respeita os requisitos químicos definidos na norma NP EN 459-1 [IPQ, 2011], apresentados no Quadro 3.3.

Quadro 3.3 – Requisitos químicos da cal cálcica (valores característicos) [IPQ, 2011]

Tipo de cal cálcica	Valores em % em massa				
	CaO + MgO	MgO	CO ₂	SO ₃	Cal disponível
CL 90	≥ 90	≤ 5	≤ 4	≤ 2	≥ 80

3.1.3. Metacaulino

Algumas das argamassas ensaiadas foram realizadas com uma substituição parcial da massa de cal por uma pozolana: um metacaulino comercial francês Argical M 1200 S da marca Imerys (Figura 3.4), que foi disponibilizado pela empresa ao LNEC para a realização dos estudos no âmbito do projecto METACAL.

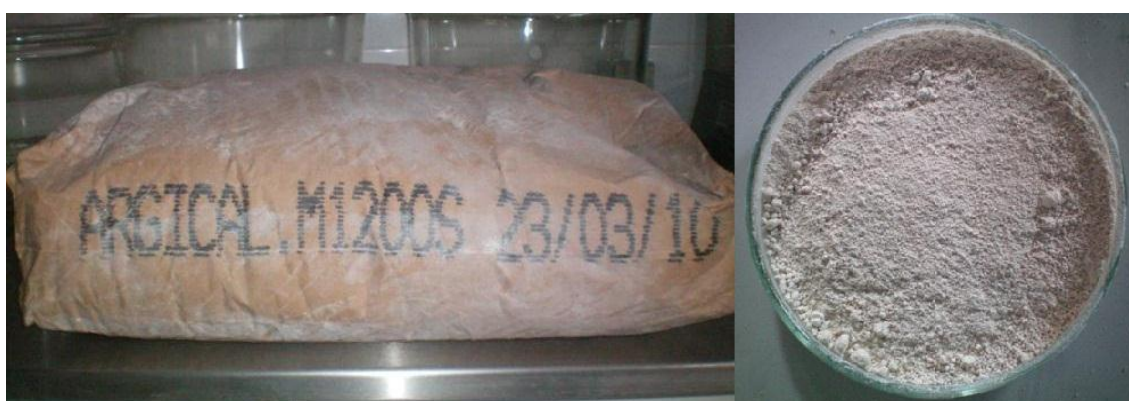


Figura 3.4 – Metacaulino Imerys Argical M 1200 S utilizado nas argamassas

Foram utilizadas percentagens de substituição parcial de 0%, 30% e 50% nas argamassas de cal aérea e de 0%, 5%, 10% e 20% nas argamassas de cal hidráulica. A baridade do metacaulino é apresentada no Quadro 3.1 e diâmetro médio de partículas é aproximadamente 4 a 5 µm [BORSOI *et al.*, 2012]. A reactividade pozolânica é de 1342mg Ca(OH)₂ /g metacaulino e a composição química do metacaulino é apresentada no Quadro 3.4. No anexo A.9 é apresentado o difractograma resultante da análise de DRX.

Quadro 3.4 – Composição química do metacaulino (em % de massa) [GAMEIRO *et al.*, 2012b]

Material	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	L.O.I.*
Metacaulino	54,39	39,36	1,75	0,01	0,14	0,10	–	1,03	1,55	0,06	1,90

*Loss on ignition (perda ao fogo)

3.2. Argamassas ensaiadas

“A preparação das argamassas bem como a sua execução foram realizadas, na sua totalidade, nos laboratórios da Secção de Construção e Hidráulica do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa (SCH/DEC/FCT-UNL). Todos os procedimentos foram efectuados tendo como base a normalização existente. No entanto,

por vezes, por inadequação ou inexistência, não foram seguidas normas de argamassas mas de outros materiais, com base em adaptações definidas e que são apresentadas ao longo do trabalho.” [CARNEIRO, 2012]

Para cada argamassa foram utilizados 3 provetes de forma a obter um mínimo de três valores em cada ensaio, possibilitando a determinação de um valor médio e do desvio padrão de cada parâmetro.

3.2.1. Argamassas de cal aérea

Para a caracterização das argamassas de cal aérea foram utilizadas 14 composições diferentes, realizadas pelo autor do estudo inicial [BRANCO, 2013], identificadas de T1 a T14. Nesse estudo foi avaliada a influência do traço e do teor de substituição de metacaulino nas argamassas de cal aérea. Assim sendo foram produzidas 9 argamassas com 3 traços volumétricos diferentes e com 3 composições de ligante diferentes. As restantes argamassas foram reajustamentos de algumas das referidas, alterando ligeiramente a quantidade de água de amassadura e, conseqüentemente, o respectivo espalhamento.

As três primeiras argamassas, T1, T2 e T3, foram realizadas com um traço volumétrico de 1:3 (ligante: agregado), as argamassas T4, T5 e T6 com traço 1:2 e as argamassas T7, T8 e T9 com um traço 1:1. Entre cada grupo de três argamassas com o mesmo traço volumétrico foram realizadas argamassas com diferentes quantidades de ligante e metacaulino, sendo uma composta apenas por cal aérea, outra com 30% de substituição de massa equivalente de cal aérea por metacaulino e outra com 50% de massa de cal aérea substituída por metacaulino. Todas as argamassas de cal aérea foram sujeitas a cura húmida, com HR de $95 \pm 5\%$ e temperatura $20 \pm 2^\circ\text{C}$.

Na designação estão identificados o traço volumétrico de cada argamassa, bem como a percentagem de substituição de metacaulino, precedidos por um CL de *calcium lime* (cal cálcica). Por exemplo a argamassa T2 – CL.3_Mk30 significa que a argamassa com base em cal aérea foi produzida com um traço volumétrico de 1:3 com 30% de massa de cal aérea substituída por metacaulino.

Os traços volumétricos e ponderais, razões água (A)/ ligante (CL) e os valores de espalhamento médio das argamassas de cal aérea, determinados por Branco (a publicar em 2013), são apresentados no Quadro 3.5.

Após a realização do ensaio de espalhamento no estudo de Branco (a publicar em 2013) foi decidido alterar a quantidade de água nalgumas argamassas de forma a ajustar os valores de espalhamento obtidos. Assim, foram repetidas 5 argamassas, alterando o teor de água relativamente às originais. As argamassas T10, T11 e T12 são reajustamentos de T1, T2 e T3, respectivamente, e as argamassas T13 e T14 são reajustamentos de T7 e T8. Todos os reajustamentos introduziram um pouco mais de água de amassadura nas argamassas, excepto no caso da argamassa CL.3, em que o reajustamento reduziu a quantidade de água de amassadura inicial.

Quadro 3.5 – Traços volumétricos e ponderais, relações água/ligante e espalhamento médio das argamassas de cal aérea (com base em [BRANCO, 2013])

Arg.	Designação	Traço volumétrico [CL+Mk: Areias]	Traço ponderal [CL+Mk: Areias]	Traço ponderal [CL:Mk: Areias]	Razão A/CL	Razão A/CL+Mk	Esp. [mm]
T1	CL.3	1:3	1:11,6	1:0:11,6	2,59	2,59	154
T10	CL.3-2	1:3	1:11,6	1:0:11,6	2,46	2,46	143
T2	CL.3_Mk30	1:3	1:11,6	1:0,4:16,6	3,51	2,46	126
T11	CL.3_Mk30-2	1:3	1:11,6	1:0,4:16,6	3,59	2,51	139
T3	CL.3_Mk50	1:3	1:11,6	1:1:23,2	5,08	2,54	121
T12	CL.3_Mk50-2	1:3	1:11,6	1:1:23,2	5,18	2,59	144
T4	CL.2	1:2	1:7,7	1:0:7,7	1,73	1,73	129
T5	CL.2_Mk30	1:2	1:7,7	1:0,4:11,1	2,63	1,84	143
T6	CL.2_Mk50	1:2	1:7,7	1:1:15,5	3,68	1,84	138
T7	CL.1	1:1	1:3,9	1:0:3,9	1,00	1,00	125
T13	CL.1-2	1:1	1:3,9	1:0:3,9	1,06	1,06	135
T8	CL.1_Mk30	1:1	1:3,9	1:0,4:5,5	1,55	1,09	133
T14	CL.1_Mk30-2	1:1	1:3,9	1:0,4:5,5	1,63	1,14	140
T9	CL.1_Mk50	1:1	1:3,9	1:1:7,7	2,35	1,17	138

3.2.2. Argamassas de cal hidráulica

Foram produzidas 10 argamassas de cal hidráulica diferentes, identificadas de J1 a J10, no âmbito do estudo de Carneiro (2012). “Os casos de J1, J2 e J3 são argamassas em que o ligante utilizado foi apenas a cal hidráulica, J4 e J5 são argamassas de cal hidráulica com substituição de 10% da sua massa por metacaulino e J6, J7, J8 são argamassas de cal hidráulica com substituição de 5%, 10% e 20% das suas massas por metacaulino, respectivamente” [CARNEIRO, 2012].

As argamassas J1, J2 e J3 foram realizadas com o intuito de avaliar a influência das condições de cura e do tempo de amassadura em argamassas só de cal hidráulica natural, as argamassas J4 e J5 foram realizadas com a mesma percentagem de metacaulino (10%) mas com condições de cura diferentes e as argamassas J6, J7 e J8 foram realizadas com o objectivo estudar a influência do teor de metacaulino em substituição da cal hidráulica, utilizando a mesma cura e tipo de amassadura. Todas as argamassas foram realizadas com um traço volumétrico 1:3.

Os traços volumétricos e ponderais (entre cal aérea, metacaulino e mistura de areias), razões água (A)/ligante (NHL ou NHL+Mk) e os valores de espalhamento médio das argamassas de cal hidráulica natural, determinados por Carneiro (2012), podem ser consultados no Quadro 3.6.

“As argamassas J9 e J10, que não estavam inicialmente previstas, são uma repetição exacta das J1 e J2, respectivamente. A repetição destas argamassas deveu-se ao facto de se pretender confirmar valores de espalhamento” [CARNEIRO, 2012].

Quadro 3.6 – Traços volumétricos e ponderais, relações água/ligante e espalhamento médio das argamassas de cal hidráulica natural (com base em [CARNEIRO, 2012])

Arg.	Designação	Traço volumétrico [NHL+Mk: Areias]	Traço ponderal [NHL+Mk: Areias]	Traço ponderal [NHL:Mk: Areias]	Razão A/NHL	Razão A/NHL+Mk	Esp. [mm]
J1	NHL.3_Lm_Hc	1:3	1:5,1	1:0:5,1	1,08	1,08	175
J9	NHL.3_Lm_Hc_2	1:3	1:5,1	1:0:5,1	1,08	1,08	160
J2	NHL.3_Sm_Sc	1:3	1:5,1	1:0:5,1	1,08	1,08	174
J10	NHL.3_Sm_Sc_2	1:3	1:5,1	1:0:5,1	1,08	1,08	158
J3	NHL.3_Sm_Hc	1:3	1:5,1	1:0:5,1	1,08	1,08	147
J4	NHL.3_Sm_Hc_10Mk	1:3	1:5,1	1:0,11:5,7	1,21	1,08	143
J5	NHL.3_Sm_Sc_10Mk	1:3	1:5,1	1:0,11:5,7	1,21	1,08	139
J6	NHL.3_Lm_Hc_5Mk	1:3	1:5,1	1:0,05:5,4	1,14	1,08	149
J7	NHL.3_Lm_Hc_10Mk	1:3	1:5,1	1:0,11:5,7	1,21	1,08	139
J8	NHL.3_Lm_Hc_20Mk	1:3	1:5,1	1:0,25:6,4	1,36	1,08	130

A designação escolhida para as argamassas pretende identificá-las de acordo com o tipo de cal, traço volumétrico, amassadura, cura e percentagem de metacaulino. A sigla NHL identifica o tipo de cal (*Natural Hydraulic Lime*, no caso classificada à data pela empresa produtora como NHL5), Lm significa período de tempo de mistura mais longo (*Long mixture*) enquanto Sm identifica o tempo de amassadura segundo a norma (*Standard mixture*). Quanto ao tipo de cura, Hc significa cura húmida (*Humid cure*) e Sc a cura de acordo com a norma (*Standard cure*). Relativamente aos teores de metacaulino, quando usados, as argamassas estão identificadas com o valor de percentagem de substituição seguido de “Mk”. Por exemplo a argamassa J4 – NHL.3_Sm_Hc_10Mk significa que foi produzida com um traço volumétrico de 1:3, realizando uma amassadura com a duração da norma (*Standard mixture*), sujeita a uma cura húmida (*Humid cure*), com uma percentagem de substituição de 10% de NHL5 por metacaulino.

3.3. Fabrico de argamassas: amassaduras, provetes e condições de cura

Determinadas as quantidades de cada componente para a formulação das argamassas, procedeu-se à sua execução. Embora não se tenha assistido à execução das argamassas caracterizadas na campanha experimental deste trabalho, o autor participou na fabricação de argamassas e realização de provetes de argamassas muito semelhantes, relativos a estudos paralelos, incluídos nos mesmos projectos da FCT já anteriormente referidos.

Inicialmente pesaram-se as quantidades dos elementos sólidos – areias, cal e metacaulino – numa balança de precisão 0,1g, consoante a argamassa a produzir. Foi realizada uma primeira homogeneização manual de todos os componentes, no tabuleiro onde estes foram pesados, e de seguida estes foram colocados na cuba metálica da misturadora mecânica utilizada para a execução das amassaduras. A quantidade de água a adicionar a cada argamassa foi medida em provetas graduadas, aferida pela parte inferior do menisco formado. Esta foi adicionada aos componentes na cuba, nos segundos iniciais em que a pá misturadora se encontrava ligada, processo que demorou

aproximadamente 20-30s. Algumas das fases de fabricação de argamassas anteriormente descritas são apresentadas na Figura 3.5, nomeadamente a mistura de areias, ligante (e metacaulino), a medição do volume de água e a adição de água na misturadora.

Como já foi referido, nas argamassas de cal hidráulica natural foi avaliada a influência do tempo de amassadura. Foram realizados então dois tipos de amassadura: uma seguindo a norma EN 1015-2 [CEN, 1998], designada como *Sm – Standard mixture* – em que a misturadora mecânica actua durante 90s; a outra, designada como *Long mixture* (Lm), definida no âmbito do projecto METACAL [FARIA, 2011], onde a mistura actua inicialmente durante 150s, é efectuada uma raspagem das paredes da cuba e da pá, juntando à restante argamassa o material aí fixado, seguindo-se mais 30s de actuação da misturadora.

As argamassas de cal aérea foram todas realizadas de acordo com o tempo de amassadura longo, definido no projecto METACAL [FARIA, 2011].



Figura 3.5 – Diferentes fases do processo de fabricação de argamassas: a) mistura de constituintes sólidos; b) medição do volume de água; c) adição de água na misturadora

Depois de determinada a consistência por espalhamento, de acordo com a norma EN 1015-3 [CEN, 1999a], foram preenchidos os moldes e compactadas as argamassas. Foram utilizados moldes metálicos prismáticos, de dimensões 40x40x160 [mm], cujas paredes tinham sido previamente revestidas com um óleo descofrante, com o objectivo de facilitar a posterior desmoldagem. Cada molde tinha capacidade para executar 3 provetes em simultâneo.

O preenchimento dos moldes (Figura 3.6) foi efectuado em duas camadas, sendo aplicadas 20 pancadas, utilizando um compactador mecânico, na primeira fase de enchimento e mais 20 pancadas após o preenchimento total dos moldes.

O excesso de argamassa à superfície dos moldes foi retirado, sendo cada molde colocado individualmente no interior de um saco de polietileno fechado, onde permaneceram durante 2 dias. Após este período os provetes de argamassas com base em cal hidráulica natural foram desmoldados, tendo ficado mais 5 dias dentro dos mesmos sacos fechados.

“A desmoldagem foi realizada com bastante cuidado no manuseamento dos utensílios utilizados, bem como dos próprios provetes, de modo a não os danificar. Com os provetes

desmoldados procedeu-se à sua identificação e recolocação dentro dos sacos de polietileno” [CARNEIRO, 2012].



Figura 3.6 – Moldes prismáticos utilizados preenchidos com argamassa

Todas as argamassas foram submetidas a cura húmida, à excepção de algumas das argamassas de cal hidráulica natural que foram submetidas a cura *standard*.

A cura húmida (*Humid cure*, Hc), definida no projecto METACAL [FARIA, 2011], consiste em condicionar os provetes a uma humidade relativa alta, no caso a $95 \pm 5\%$ e uma temperatura de $20 \pm 2^\circ\text{C}$, durante o período de cura definido, neste caso 180 dias. Estas condições foram garantidas pela colocação dos provetes sobre prateleiras de rede, colocadas dentro de um tanque cujo fundo continha uma certa altura de água, e que estava tapado por uma membrana de polietileno, numa sala fechada e isolada (figura 3.7) em que as condições de temperatura e de humidade relativa eram, sempre que possível, monitorizadas em contínuo através de sensor. Os respectivos registos podem analisar-se no anexo A.1.

A cura *standard* (*Standard cure*, Sm) foi baseada na norma EN 1015-11 [CEN, 1999b], onde se garantiram, numa sala fechada, isolada e climatizada mecanicamente no DEC/FCT-UNL (Figura 3.7), condições de humidade relativa de $65 \pm 5\%$ e uma temperatura de $20 \pm 2^\circ\text{C}$.



Figura 3.7 – Salas de cura húmida (a) e de cura *standard* (b))

As designações completas, composições, tipos de amassadura e condições de cura das argamassas estudadas são resumidas no Quadro 3.7.

Quadro 3.7 – Resumo das características das argamassas ensaiadas

Designação	Ligante	Traço vol. [Lig.+Mk:Areias]	Amassadura	Cura	Teor de Mk [%]
CL.3	CL 90	1:3	<i>Standard mix.</i>	<i>Humid cure</i>	0
CL.3_Mk30	CL 90	1:3	<i>Standard mix.</i>	<i>Humid cure</i>	30
CL.3_Mk50	CL 90	1:3	<i>Standard mix.</i>	<i>Humid cure</i>	50
CL.2	CL 90	1:2	<i>Standard mix.</i>	<i>Humid cure</i>	0
CL.2_Mk30	CL 90	1:2	<i>Standard mix.</i>	<i>Humid cure</i>	30
CL.2_Mk50	CL 90	1:2	<i>Standard mix.</i>	<i>Humid cure</i>	50
CL.1	CL 90	1:1	<i>Standard mix.</i>	<i>Humid cure</i>	0
CL.1_Mk30	CL 90	1:1	<i>Standard mix.</i>	<i>Humid cure</i>	30
CL.1_Mk50	CL 90	1:1	<i>Standard mix.</i>	<i>Humid cure</i>	50
NHL.3_Lm_Hc	NHL 5	1:3	<i>Long mix.</i>	<i>Humid cure</i>	0
NHL.3_Sm_Sc	NHL 5	1:3	<i>Standard mix.</i>	<i>Standard cure</i>	0
NHL.3_Sm_Hc	NHL 5	1:3	<i>Standard mix.</i>	<i>Humid cure</i>	0
NHL.3_Sm_Hc_10Mk	NHL 5	1:3	<i>Standard mix.</i>	<i>Humid cure</i>	10
NHL.3_Sm_Sc_10Mk	NHL 5	1:3	<i>Standard mix.</i>	<i>Standard cure</i>	10
NHL.3_Lm_Hc_5Mk	NHL 5	1:3	<i>Long mix.</i>	<i>Humid cure</i>	5
NHL.3_Lm_Hc_10Mk	NHL 5	1:3	<i>Long mix.</i>	<i>Humid cure</i>	10
NHL.3_Lm_Hc_20Mk	NHL 5	1:3	<i>Long mix.</i>	<i>Humid cure</i>	20

3.4. Ensaios de caracterização

Antes de se iniciar a campanha experimental das argamassas endurecidas, todos os provetes que estavam na cura húmida foram colocados cerca de 24 horas na sala de cura *Standard*, isto é, a uma temperatura e humidade relativa controladas de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ e $65 \pm 5\%$ respectivamente, juntamente com os provetes de cura *standard* que já lá estavam. Esta condição permite alguma uniformização do teor de humidade das argamassas, antes de se iniciarem os ensaios; no entanto, tal não permite que todas as argamassas se encontrem em iguais condições de humidade, nomeadamente as que estiveram em cura húmida. O mais elevado teor de humidade desses provetes dificultou a obtenção de resultados coerentes no módulo de elasticidade dinâmico, uma vez que o ensaio é muito sensível ao teor de humidade dos provetes.

No primeiro ensaio de caracterização realizado – módulo de elasticidade dinâmico – foram utilizados os provetes de dimensões 40x40x160 [mm]. De seguida estes foram sujeitos a ensaios destrutivos – resistências à tracção por flexão e à compressão -, dando origem a novos provetes, utilizados nos ensaios seguintes - de porosidade aberta, difracção de raios X e análise termogravimétrica. porosimetria de mercúrio; de absorção de água por capilaridade, secagem,

condutibilidade térmica e resistência à acção de sulfatos. A Figura 3.8 apresenta a sequência de utilização de provetes para a realização dos ensaios de caracterização.

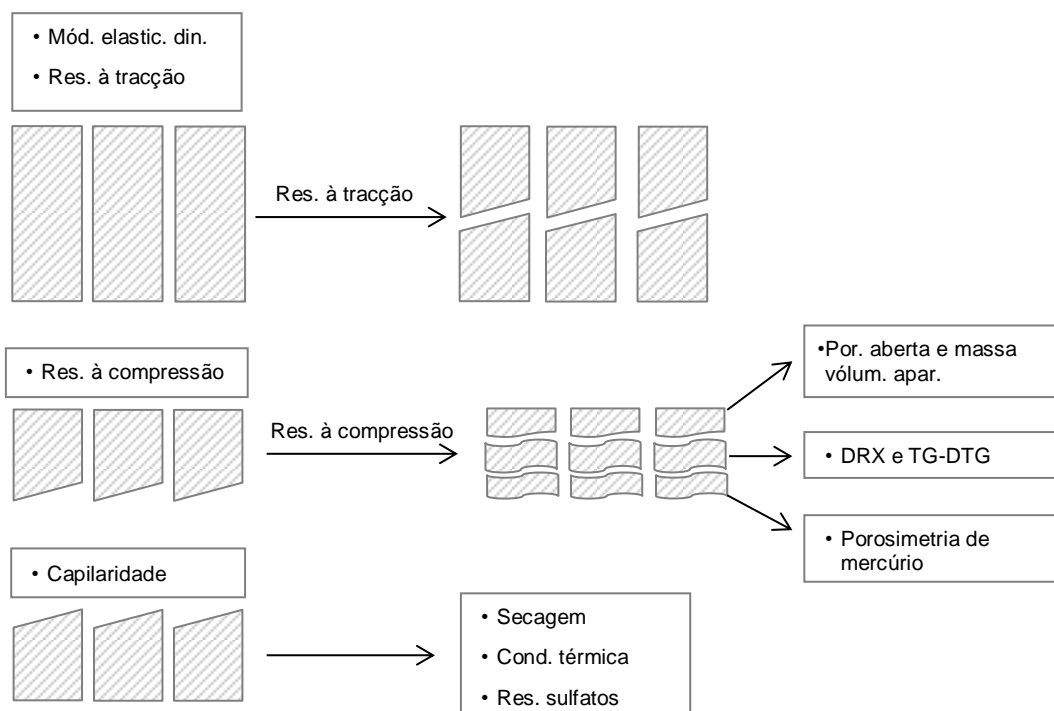


Figura 3.8 – Sequência de utilização dos provetes nos ensaios

3.4.1. Módulo de elasticidade dinâmico

O processo utilizado na determinação do módulo de elasticidade foi baseado na norma NP EN 14146 [IPQ, 2007] definida para métodos de ensaio de pedra natural, através da medição da frequência de ressonância fundamental.

O ensaio foi realizado no Laboratório de Ensaio Mecânicos e Durabilidade da Secção de Construção e Hidráulica do DEC/FCT UNL, utilizando o equipamento “ZEUS Resonance Meter” (ZRM 001), adequado para este ensaio (Figura 3.9).



Figura 3.9 – Equipamento ZEUS Resonance Meter utilizado na determinação do Ed

- Procedimento de ensaio

Cada provete foi pesado individualmente numa balança de precisão de 0,001g, ainda na sala de cura *standard*, e seguidamente colocado no suporte próprio do equipamento, com um topo em contacto com a fonte emissora de vibrações e o outro colocado em contacto com a unidade de recepção.

Foram inseridos no programa de cálculo do equipamento (Figura 3.10) as características do provete: a massa, determinada anteriormente (em décimas de grama) e as dimensões (em milímetro), constantes em todos dos provetes, geralmente 40x40x160 [mm].

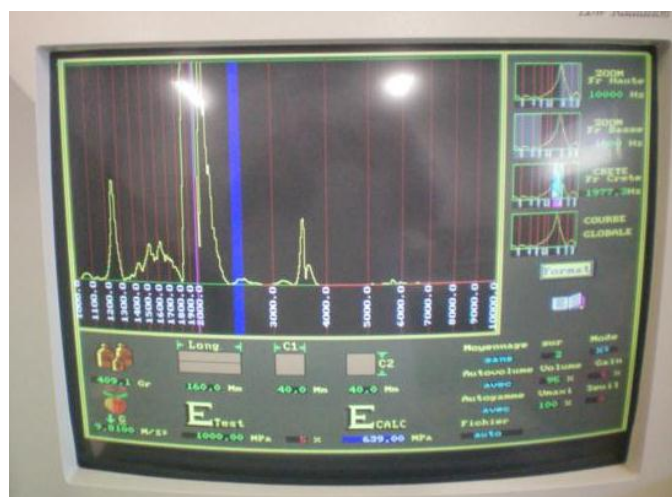


Figura 3.10 – Software do equipamento ZEUS Resonance Meter

Este programa determina automaticamente o valor do módulo de elasticidade dinâmico E_d [MPa] (expressão 3.1), a partir do comprimento do provete L [mm], da frequência de ressonância longitudinal calculada f_0 [Hz], do peso volúmico do provete ρ [N/m³] (calculado a partir da sua massa e do seu volume) e da aceleração da gravidade (9,81 m/s²). A frequência de ressonância longitudinal corresponde à frequência mais alta para a qual se obtém uma amplitude máxima [FARIA, 2004].

$$E_d = (2 \times L \times f_0)^2 \times \frac{\rho}{g} \times 10^{-6} \quad [\text{MPa}] \quad (3.1)$$

Para cada provete efectuaram-se um mínimo de quatro determinações de valores de E_d , alternando o topo em contacto com o emissor e as faces de apoio. Por vezes são obtidas diferentes gamas de valores, sendo necessária uma posterior análise e selecção da gama de valores correcta. Para tal é fundamental a comparação de valores com os resultados de idades anteriores ou de argamassas semelhantes e com os valores de resistências mecânicas. Foi calculada a média dos 3 provetes de cada argamassa e o respectivo desvio padrão.

Como se trata de um ensaio não-destrutivo, todos os provetes, depois de ensaiados, foram utilizados nos ensaios de resistência mecânica.

3.4.2. Resistência à tracção por flexão

O ensaio de determinação de resistência à tracção por flexão realizou-se depois de concluído o ensaio de determinação do módulo de elasticidade dinâmico. A metodologia do ensaio foi baseada na norma EN 1015-11 [CEN, 1999].

Preparou-se o equipamento de ensaio utilizado, uma máquina universal Zwick/Rowell, com uma célula de carga de 2kN, própria para o ensaio de flexão a este tipo de provetes. Este ensaio foi realizado no mesmo laboratório de ensaios da SCH/DEC/FCT-UNL onde foi realizado o ensaio para determinação de E_d . A tracção no provete foi provocada por uma flexão imposta por acção em 3 pontos: pela extremidade da célula de carga e por dois apoios acessórios do aparelho (Figura 3.11).



Figura 3.11 – Ensaio de resistência à tracção por flexão

- Procedimento de ensaio

Cada provete foi colocado sobre os apoios adequados do aparelho para este tipo de ensaios, a uma distância de 100mm entre si, com a face mais rugosa disposta lateralmente. Isto permite que, tanto o contacto com a célula de carga, aplicada a meio vão do provete, como o contacto com os apoios seja feito com as superfícies mais lisas, evitando assim irregularidades nas faces de contacto. Foi necessário ainda garantir a total perpendicularidade do provete à célula de carga.

Seguidamente foi iniciado o carregamento, provocado por uma célula de carga de 2kN, através do software correspondente do equipamento, que se deu a uma velocidade constante de 0,2 mm/min. O software de cálculo apresenta graficamente, em tempo real, a força aplicada [N] em função do tempo decorrido [s] e regista também a máxima força (F_f) aplicada imediatamente antes da rotura. O período de tempo em que decorreu o ensaio foi também o definido na norma (30 a 90s).

Com esta força máxima e utilizando a expressão 3.2, que consta na norma EN 1015-11 [CEN, 1999], obtém-se a resistência à tracção por flexão (R_t):

$$R_t = \frac{1,5 \times F_f \times l}{b^3} \quad [\text{MPa}] \quad (3.2)$$

com:

- l – distância entre apoios, em milímetros [100 mm];
- b – lado da secção quadrada do provete, em milímetros [40 mm].

Após a realização do ensaio, recolheram-se as duas metades resultantes após a rotura, sendo uma delas preparada para a realização do ensaio de resistência à compressão e a outra para o ensaio de absorção de água por capilaridade (após secagem em estufa).

3.4.3. Resistência à compressão

A determinação da resistência à compressão das argamassas foi baseada na mesma norma utilizada para a determinação da resistência à tracção por flexão, a norma EN 1015-11 [CEN, 1999]. O ensaio foi realizado após conclusão do ensaio de resistência à tracção, usando o mesmo equipamento de ensaio, Zwick/Rowell, utilizando uma célula de carga neste caso de 50kN, e com diferentes utensílios auxiliares (Figura 3.12).



Figura 3.12 – Ensaio de resistência à compressão

- Procedimento de ensaio

Uma metade de cada provete, resultante do ensaio de resistência à tracção, foi colocada com a face rugosa lateralmente, como realizado no ensaio anterior, num dispositivo auxiliar que faz o contacto entre os “pratos” do aparelho de ensaio e o provete e transmite a força aplicada a este.

De seguida, no software correspondente do equipamento, deu-se início ao carregamento, que se procede a uma velocidade constante de 0.7 mm/min. Este regista em tempo real um gráfico força aplicada/tempo e a força máxima de compressão (F_c), que ocorre antes da rotura.

Através desta força máxima de compressão, F_c [N], obtém-se a resistência à compressão (R_c) do provete utilizando a expressão 3.3, referida na norma EN 1015-11 [CEN, 1999]:

$$R_c = \frac{F_c}{S} \quad [\text{MPa}] \quad (3.3)$$

Em que:

- S – área de aplicação da carga [40x40 mm²].

Após a realização do ensaio são recolhidos os 3 pedaços em que o provete se divide, obtidos pela rotura do mesmo, como é possível observar na Figura 3.12. O topo liso foi utilizado no ensaio de porosidade aberta, enquanto os pedaços centrais foram utilizados para a caracterização química e mineralógica das argamassas e os pedaços relativos ao outro topo foram utilizados para a caracterização microestrutural. Todos os pedaços foram guardados em estufa a 60°C, para condições de massa constante (variação de massa inferior a 0,1% em 24 horas) e posteriormente fechados em sacos de polietileno, na tentativa de paragem da respectiva cura.

3.4.4. Absorção de água por capilaridade

O ensaio tem como objectivo determinar o coeficiente de capilaridade (CC), correspondente ao declive inicial da curva de absorção capilar, bem como o valor assintótico (VA) da mesma curva.

De forma a ficarem em condições de massa constante, os provetes foram colocados em estufa a 60°C, um mínimo de dois dias antes do início do ensaio, cujo procedimento foi baseado nas normas EN 1015-18 [CEN, 2002] e EN 15801 [CEN, 2009], tendo sido efectuadas algumas adaptações. O ensaio foi realizado na sala de cura *standard* do DEC/FCT-UNL, a uma temperatura e humidade relativa controladas de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ e $65 \pm 5\%$ respectivamente, tal como sugerem as normas referidas.

É importante que no primeiro dia de ensaio este decorra simultaneamente com a elaboração da curva de absorção capilar de forma a garantir que é acompanhado o declive inicial de absorção de água até se atingir o início do patamar de estabilização, processo que pode demorar até cerca de 9h como foi possível observar nas argamassas ensaiadas.

- Procedimento de ensaio

Tal como foi referido, o ensaio teve início apenas após ser garantida a massa constante dos provetes. Após os provetes serem retirados da estufa, foi necessário esperar que estes arrefecessem para que pudessem ser manuseados.

A preparação dos provetes iniciou-se com o envolvimento destes com uma película aderente de polietileno, com a função de garantir que a absorção de água fosse efectuada apenas pela base do provete, garantindo também que o fluxo ascensional e unidireccional da água fosse efectuado sem perdas pelas superfícies laterais. É importante que a película adira bem ao provete de forma a evitar que esta se separe durante o decorrer do ensaio. A película deve ser colocada com o cuidado adequado à fragilidade do provete, de forma a evitar que este se desintegre. Os provetes foram pesados antes do processo seguinte (massa seca, sem gaze).

Foi então colocada uma gaze na base do provete, presa com um elástico. É necessário garantir que a malha da gaze é suficientemente cerrada de forma a evitar o máximo de perdas de

massa possível e que, por outro lado, é aberta o suficiente de forma a assegurar a normalidade do fluxo de absorção de água pelo provete. Os provetes foram novamente pesados (massa seca, com gaze).

O aspecto do provete, antes do início do ensaio, é observável na Figura 3.13.

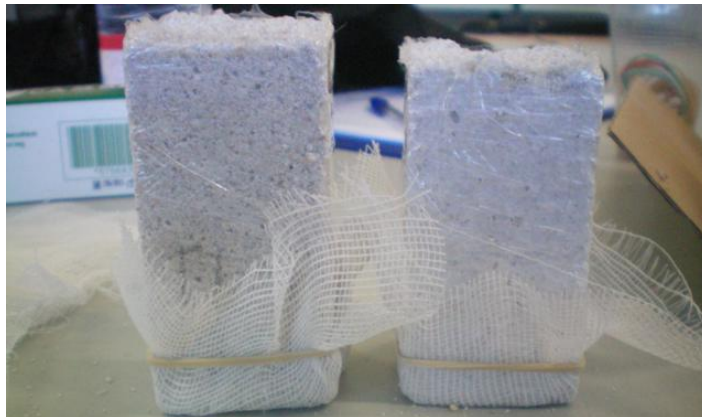


Figura 3.13 – Aspecto dos provetes antes do início do ensaio de absorção capilar

Foram preparadas caixas plásticas para a realização deste ensaio. Estas continham uma camada de água no fundo, de forma a manter um ambiente saturado de humidade e encontravam-se fechados sempre que possível. Dentro destas foi colocado um tabuleiro de base rígida e plana, que se encontrava sobreelevado em relação à água do recipiente, e nivelado. No fundo do tabuleiro foi colocada uma rede sintética (para sobreelevar a base dos provetes e facilitar a absorção de água pela sua base) e uma lâmina de água com 5 mm de altura acima da rede (Figura 3.14). É importante garantir a manutenção desta altura de água, que tende a diminuir ao longo das primeiras horas do decorrer do ensaio, quando a absorção de água dos provetes é elevada.

Cada provete foi pesado no instante 0s e colocado no tabuleiro; foram feitas pesagens dos provetes após 5, 10, 15 e 30 minutos e depois de hora em hora até a curva de absorção de água atingir o início do patamar de estabilização, processo que demora algumas horas, dependendo da estrutura porosa dos provetes. Cada provete foi retirado individualmente e com cuidado, evitando que o excesso de água caia sobre os outros provetes. As pesagens foram efectuadas utilizando uma balança de precisão 0,001g (Figura 3.14).

A curva de absorção foi obtida através do gráfico que exprime a quantidade de água absorvida por área da base [kg/m^2] em função da raiz quadrada do tempo [$\text{min}^{1/2}$] sendo a quantidade de água absorvida (M) expressa pela expressão 3.4.

$$M = \frac{m_i - m_o}{S} \quad [\text{Kg/m}^2] \quad (3.4)$$

em que:

- m_i – massa do provete no instante t_i [kg];
- m_o – massa do provete seco (com gaze) [kg];
- S – área da superfície do provete em contacto com a água [$0,04 \times 0,04 \text{ m}^2$].

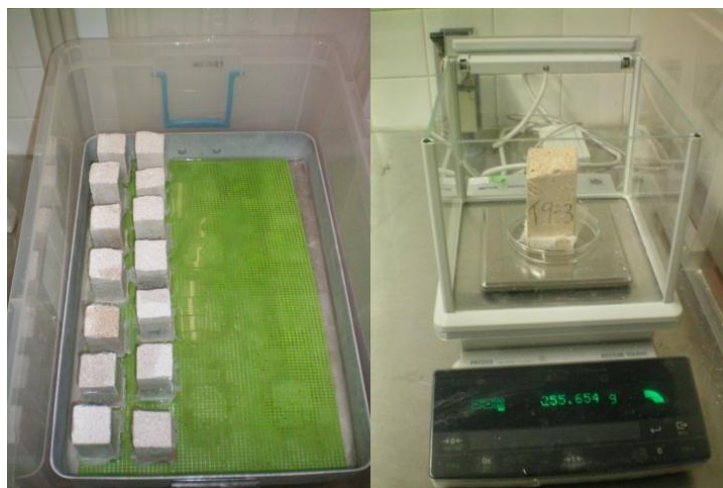


Figura 3.14 – Ensaio de absorção capilar

A norma EN 15801 [CEN, 2009] define duas condições para o ensaio terminar: caso a diferença de massa entre duas pesagens sucessivas de 24 horas seja inferior a 1% ou, se este patamar não for obtido, dá-se por concluído o ensaio ao fim de 8 dias. Esta última foi a condição verificada, embora com valores muito próximos de 1%

A massa saturada da gaze foi posteriormente subtraída em todas as pesagens, excepto na pesagem inicial onde foi contabilizado o peso inicial do provete sem gaze. Este processo evita assim a contabilização da água absorvida por capilaridade pela gaze.

O coeficiente de capilaridade (CC) obtém-se através da realização de uma regressão linear dos pontos iniciais da curva, representativos do declive inicial da mesma. O valor de CC corresponde à inclinação (m) da recta obtida pela regressão linear: $y = m * x + b$. A título de exemplo é apresentado na Figura 3.15 o troço inicial da curva de absorção capilar da argamassa CL.3_Mk30-2 e o CC determinado por regressão linear.

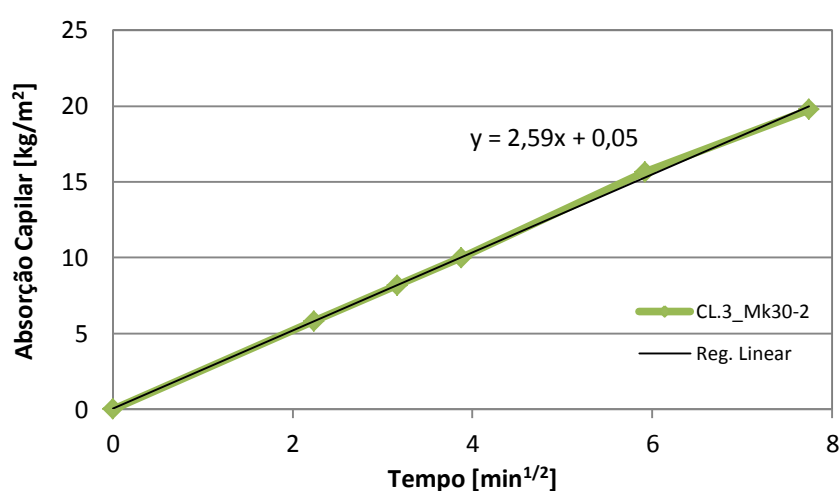


Figura 3.15 – Coeficiente de capilaridade determinado por regressão linear

Outro método de obtenção do coeficiente – método simplificado – é através da análise do declive entre dois pontos iniciais, não necessariamente consecutivos, representativos do declive

inicial da curva de absorção de água, correspondente ao coeficiente de capilaridade, tal como representa a expressão 3.5.

$$CC = \frac{M_i - M_0}{\sqrt{t_i - t_0}} \quad (3.5)$$

com:

- M_i – quantidade de água absorvida até ao instante t_i considerado [kg/m^2];
- M_0 – quantidade de água absorvida até ao instante t_0 considerado [kg/m^2];
- t_i – instante i considerado [min];
- t_0 – instante inicial considerado [min].

O valor assintótico corresponde à quantidade de água absorvida [kg/m^2] no final do ensaio.

3.4.5. Secagem

O ensaio de secagem (Figura 3.16) iniciou-se imediatamente após concluído o ensaio de absorção de água por capilaridade. O seu procedimento foi baseado no Test No. II.5 “Evaporation curve” da RILEM (1980) e em Brito et al. (2011). O ensaio decorreu na mesma sala que o ensaio anterior, condicionada a uma temperatura de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ e a uma humidade relativa de $65 \pm 5\%$.

Manteve-se a película aderente nos provetes neste ensaio pelo mesmo motivo para o qual fora colocada: garantir a secagem apenas pelo topo, evitando a evaporação pelas superfícies laterais.



Figura 3.16 – Ensaio de secagem

Previamente definiu-se que o ensaio decorreria no mínimo com a mesma duração que os estudos de Branco (a publicar em 2013) e Carneiro (2012), respectivamente 510 e 340 horas. No entanto, no decorrer do ensaio observou-se que o teor de água ainda era elevado nos instantes referidos, prolongando-se o ensaio até que os provetes atingissem valores de teor de água próximos dos 2%.

- Procedimento de ensaio

Após a última pesagem do ensaio de capilaridade foi retirada a gaze e o elástico de cada provete, pesando-o de seguida, dando início imediato ao ensaio de secagem. O manuseando dos provetes foi realizado com cuidado, de forma a evitar qualquer perda de massa. Depois de pesados, os provetes foram colocados directamente sobre a bancada metálica lisa da sala onde decorreu o ensaio, de modo a impedir a secagem por qualquer face excepto pelo topo superior.

No primeiro dia de ensaio foram efectuadas pesagens, utilizando uma balança com precisão de 0,001g, de hora em hora até 6h, sendo no segundo dia efectuadas três pesagens e a partir do terceiro dia as pesagens foram efectuadas de 24 em 24 horas.

Em simultâneo com o decorrer do ensaio foi efectuada a curva de secagem de cada provete, expressa por um gráfico com o teor de água [%] (ou pela quantidade de água existente em função da área do topo) em função do tempo [h], em que o teor de água (W_t) foi obtido pela expressão 3.6.

$$W_t = \frac{m_i - m_o}{m_o} \times 100 \quad [\%] \quad (3.6)$$

em que:

- m_i – massa do provete no instante t_i [kg];
- m_o – massa do provete seco [kg].

Deu-se por terminado o ensaio após o teor de água da maioria dos provetes ser inferior a 2%, tendo apenas 3 não verificado essa condição ao fim de 862 horas.

Os resultados do ensaio de secagem podem ser representados por um parâmetro quantitativo, o índice de secagem (IS), que foi calculado utilizando o método simplificado de integração numérica, a regra do trapézio [BRITO *et al.*, 2011; FARIA, 2012b], através da expressão 3.7.

$$IS = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} \left[(t_i - t_{i-1}) \times \frac{Q_{i-1} + Q_i}{2} \right]}{Q_{\max} \times t_f} \quad (3.7)$$

Na expressão 3.7, t_i é o tempo de ensaio i , em horas; t_f é o tempo final do ensaio, em horas; Q_i é a quantidade de água no interior do provete no instante i , em % relativamente à massa seca; Q_{\max} é a quantidade de água inicial, em % relativamente à massa seca.

Para que os resultados fossem comparáveis com os estudos realizados por Branco (a publicar em 2013) e Carneiro (2012), em argamassas mais jovens, foram determinados dois valores de IS: um contabilizando o tempo total do ensaio realizado, outro considerando o tempo final dos estudos anteriormente referidos.

Foram ainda determinados mais dois parâmetros com os resultados do ensaio de secagem: a taxa de secagem e o coeficiente de secagem. O parâmetro taxa de secagem já fora abordado em

estudos anteriores, nomeadamente no de Gonçalves (2007), que define a taxa de secagem como o declive da curva de secagem, em função do tempo. Este estudo caracteriza também três fases distintas de secagem, como é possível observar na Figura 3.17.

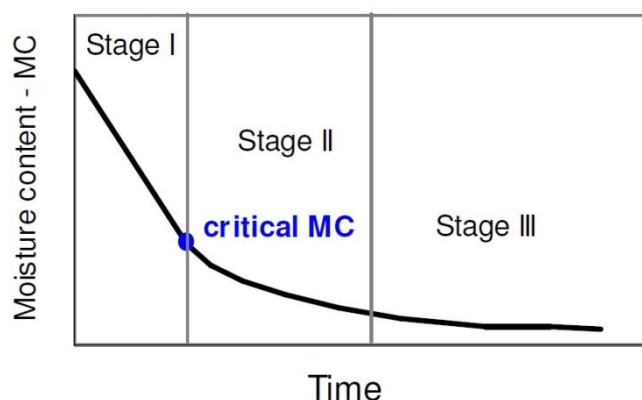


Figura 3.17 – Curva de secagem típica de um material de construção poroso [GONÇALVES, 2007]

A taxa de secagem, analisada no presente estudo, é referente ao declive inicial da curva de secagem (em kg/m^2), correspondente à fase 1 da Figura 3.17. O valor da respectiva taxa corresponde ao declive da recta de uma regressão linear entre o ponto inicial da curva de secagem e o ponto de inflexão entre a fase 1 e a fase 2 de secagem (teor de água crítico).

Com os valores do ensaio de secagem foi ainda traçado um gráfico da quantidade de água presente na argamassa em função da raiz do tempo, em horas $[\text{h}^{1/2}]$. O coeficiente de secagem determinado corresponde ao declive do gráfico, onde este é mais acentuado, obtido através da realização de uma regressão linear entre os pontos que o definem.

A título de exemplo é apresentada na Figura 3.18 o desenvolvimento do teor de água presente na argamassa CL.3, em função do tempo $[\text{h}]$, e a ilustração de como é determinado o Índice de Secagem (IS). Na Figura 3.19 estão representadas as curvas de secagem da mesma argamassa, em função do tempo $[\text{h}]$, à esquerda, e respectiva Taxa de Secagem (TS); à direita, em função da raiz do tempo $[\text{h}^{1/2}]$, é apresentado o parâmetro Coeficiente de Secagem (CS).

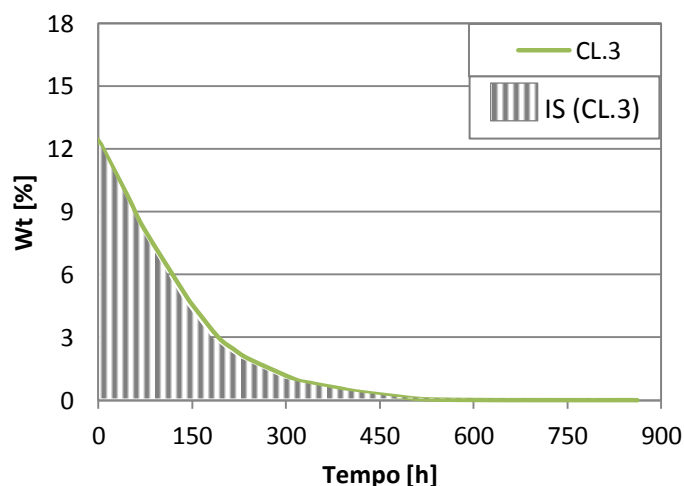


Figura 3.18 – Curva de teor de água e representação do Índice de Secagem (IS)

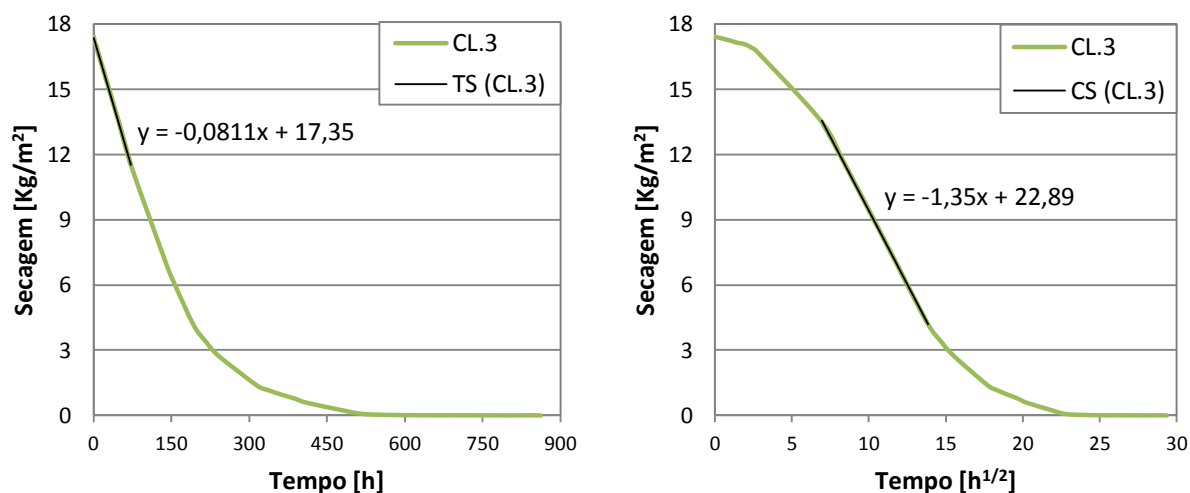


Figura 3.19 – Curvas de secagem e respectivos parâmetros Taxa de Secagem e Coeficiente de Secagem

3.4.6. Porosidade aberta e massa volúmica aparente

Os valores para determinação da porosidade aberta e da massa volúmica aparente foram obtidos através do mesmo ensaio. Para a realização deste foram utilizados os topos dos provetes resultantes e aproveitados do ensaio de resistência à compressão.

Este ensaio decorreu num laboratório da SCH/DEC/FCT-UNL, segundo um procedimento baseado na norma NP EN 1936 [IPQ, 2008], estabelecida para métodos de ensaio de pedra natural. No entanto foi efectuada uma adaptação bastante condicionante nos resultados obtidos: a protecção dos provetes com um tecido de nylon. Este tecido tem como objectivo evitar possíveis perdas de massa durante o decorrer do ensaio.

- Procedimento de ensaio

Após o ensaio de compressão, os provetes que se encontravam em estufa ventilada a 60°C durante cerca de uma semana, foram retirados e limpos de forma a eliminar o material desagregado à superfície. De seguida cada provete foi pesado individualmente (m_0) numa balança de precisão 0,001g.

Após pesados, os provetes foram então envolvidos por um tecido de nylon, atado nas extremidades por fio do mesmo material (fio de pesca comum) e pesados novamente (m_1).

Foram efectuadas umas pequenas aberturas no tecido, na superfície superior, de forma a evitar a acumulação de bolhas de ar no seu interior, factor que se considerou poder influenciar o ensaio. Estas aberturas foram executadas com o auxílio de um ferro de soldar (Figura 3.20).

Finalizada a preparação dos provetes, estes foram colocados num exsiccador que se encontrava ligado a um tubo de introdução de água e a uma bomba de vácuo (Figura 3.21). O exsiccador foi tapado, garantindo o isolamento, e foi ligada a bomba de vácuo, reduzindo a pressão dentro do exsiccador. Mantém-se esta condição durante 24 horas.



Figura 3.20 – Preparação dos provetes para o ensaio de porosidade aberta e massa volúmica aparente

Após 24 horas foi inserida água no exsicador, através do tubo que se encontrava ligado a este, até que a totalidade dos provetes ficasse submersa. A introdução de água foi efectuada de forma lenta (o processo demorou mais de 15 minutos). Os provetes foram mantidos nesta condição de pressão e imersão durante mais 24 horas.

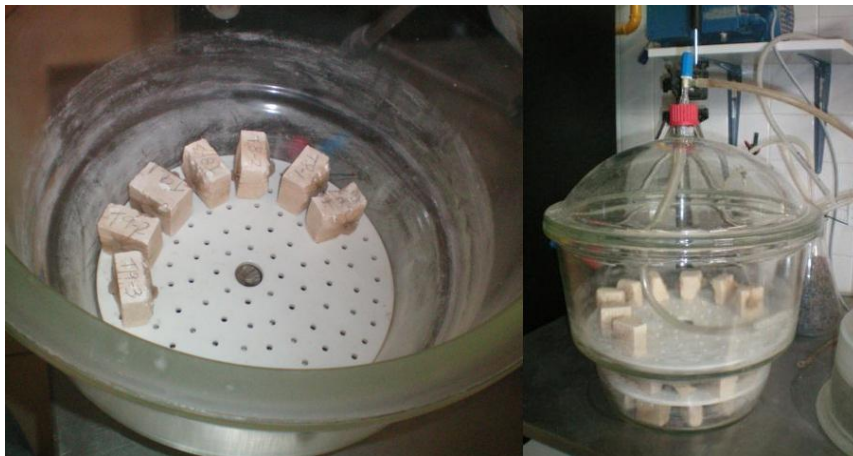


Figura 3.21 – Ensaio de determinação da porosidade aberta e massa volúmica aparente

Passado este período, a tampa do exsicador foi aberta, submetendo então os provetes à pressão atmosférica. Aguardou-se novamente 24 horas, mantendo os provetes totalmente imersos, até se proceder então a uma nova fase de pesagens.

Cada provete foi então retirado do exsicador e imediatamente pesado em imersão (pesagem hidrostática, m_2), utilizando um suporte acoplado debaixo de uma balança, colocado dentro de água (Figura 3.22). Foram efectuadas pesagens hidrostáticas apenas a 3 provetes seguidos, evitando a perda de água destes. Assim, após esta pesagem, os provetes foram colocados sobre um pano húmido, de forma a retirar a água em excesso. Seguidamente foram pesados, obtendo-se a massa saturada dos provetes (m_3). Este ciclo de pesagens repetiu-se utilizando 3 provetes de cada vez.



Figura 3.22 – Balança adaptada para o ensaio de Pab e MVap

Utilizando as massas m_1 , m_2 e m_3 calculou-se a massa volúmica aparente e a porosidade aberta dos provetes. A massa volúmica aparente (MV_{ap}) foi obtida através da expressão 3.8.

$$MV_{ap} = \frac{m}{V} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \times 10^3 \text{ [kg/m}^3\text{]} \quad (3.8)$$

com:

- m – massa do provete
- V – volume total do provete
- m_1 – massa seca do provete [g];
- m_2 – massa hidrostática do provete [g];
- m_3 – massa saturada do provete [g].

A porosidade aberta (P_{ab}) foi calculada pela expressão 3.9.

$$P_{ab} = \frac{v}{V} = \frac{m_3 - m_1}{m_3 - m_2} \times 100 \text{ [%]} \quad (3.9)$$

com:

- v – volume de vazios do provete

Depois de calculados os valores de porosidade aberta foi determinada a média e o respectivo desvio padrão de cada argamassa.

3.4.7. Condutibilidade térmica

A condutibilidade térmica (λ) é uma característica própria de cada material que traduz a forma como uma camada do material se deixa atravessar pelo calor, podendo ser definida como a quantidade de calor que atravessa a unidade de espessura do material, por unidade de área, por unidade de diferença de temperatura [W/m.°C] [HENRIQUES, 2007].

Para a avaliação da condutibilidade térmica das argamassas foi utilizado um equipamento denominado ISOMET 2104 (Heat Transfer Analyser), utilizando uma sonda de superfície API 210412, sendo o procedimento de ensaio baseado no manual do equipamento.

As medições realizadas pelo aparelho são baseadas na análise da resposta térmica do material relativamente aos impulsos de fluxo térmico. Este fluxo térmico é emitido por aquecimento eléctrico de uma resistência inserida no sensor, que está em contacto directo com a amostra em análise [APPLIED PRECISION, s.d.].

Uma vez que a sonda utilizada do aparelho está indicada para superfícies lisas de pelo menos 60 mm de diâmetro [APPLIED PRECISION, s.d.] e os provetes analisados apenas têm uma largura de 40mm, os resultados obtidos serão apenas utilizados no âmbito comparativo das argamassas e não devem ser interpretados como valores característicos das mesmas. Embora este ensaio não seja condicionante para o estudo em causa, procedeu-se à sua realização para que, a nível mais abrangente, e por comparação entre argamassas avaliadas a partir de provetes da mesma dimensão, se possa ir formando uma base de dados de λ .

- Procedimento de ensaio

Após terminado o ensaio de secagem procedeu-se ao ensaio de condutibilidade térmica, que decorreu na sala de cura *standard* do DEC, condicionada a uma temperatura de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ e a uma humidade relativa de $65 \pm 5\%$.

A película aderente, que fora colocada para a realização do ensaio de capilaridade e secagem, foi retirada e os provetes foram colocados sobre uma placa de XPS, garantindo a homogeneidade da condição de fronteira inferior, em todos os ensaios.

A sonda de superfície foi colocada sobre uma das faces mais lisas (das 3 que encontravam em contacto com o molde, quando o provete foi feito) e seleccionou-se a opção Thermal Conductivity do aparelho, dando inicio ao ensaio (Figura 3.23). O processo demora cerca de 15/20 minutos até ao aparelho fornecer os resultados de condutibilidade térmica, λ [W/m.K], valor pretendido para o estudo, o calor específico por volume, c_p [J/m³.K] e a difusibilidade térmica, a [m²/s].



Figura 3.23 – Ensaio de condutibilidade térmica

Esse valor de condutibilidade térmica foi registado e procedeu-se à análise da condutibilidade térmica do mesmo provete, mas colocando a sonda em contacto com outra das superfícies lisas. Caso a diferença entre os valores das duas medições ao mesmo provete fosse inferior a 5% a análise a este considerava-se terminada, pela média dos 2 valores; caso tal não acontecesse era necessário proceder a uma nova medição, colocando a última das faces lisas em contacto com a sonda.

Finalizado o ensaio foi calculada a média de cada argamassa e o respectivo desvio padrão.

3.4.8. Resistência aos sulfatos

O ensaio de resistência das argamassas ao ataque por sulfatos foi baseado na norma NP EN 12370, desenvolvida para ensaio de pedras naturais. Baseado no estudo de Faria (2004) que constatou que o procedimento proposto pela norma era demasiado destrutivo para os provetes de argamassa de cal, foi utilizada uma concentração da solução de imersão de 3,09% do sulfato de sódio anidro (metade da concentração definida pela norma).

Este ensaio iniciou-se após terminado o ensaio de condutibilidade térmica, utilizando os mesmos provetes.

- Procedimento de ensaio

Previamente os provetes foram colocados em estufa ventilada a 105°C, onde permaneceram durante 24 horas. Foi então preparada uma solução de 3,09% de Na₂SO₄, utilizando 329g de sulfato de sódio anidro por cada 10l de água potável. Esta solução foi colocada num recipiente plástico com tampa, com um estrado do mesmo material no fundo, que permite a absorção de solução pela base dos provetes.

Após a secagem completa, os provetes foram arrefecidos até à temperatura ambiente e pesados individualmente, numa balança de precisão de 0,001g, registando-se a sua massa inicial. Foram então imersos na solução durante 2 horas (Figura 3.24). Neste processo foi garantido o afastamento aproximado de 1 cm entre provetes, 2 cm com as paredes da caixa de plástico e uma altura de solução acima dos provetes mínima de 5mm.

Quando retirados da solução, foi necessário remover a solução superficial em excesso dos provetes, rolando-os sobre uma membrana sintética e um pano (Figura 3.24) de forma a evitar a aderência dos provetes ao tabuleiro metálico, por secagem da solução entre as faces de contacto. Os provetes foram novamente colocados na estufa ventilada a 105°C durante um mínimo de 21 ± 1h.

Terminado o tempo de secagem os provetes foram novamente pesados individualmente e avaliada a sua integridade, nomeadamente por registo fotográfico.

O ciclo de imersão/ secagem/ pesagem foi repetido 20 vezes, dando por terminado o ensaio, ou quando o provete se desintegrava (perda de massa superior a 70%). Foi efectuado um registo fotográfico de cada grupo de argamassas distintas e foi recolhida uma amostra de cada, caso futuramente seja realizada a análise mineralógica das argamassas contaminadas.



Figura 3.24 – Ensaio de resistência aos sulfatos

3.4.9. Porosimetria de mercúrio

Para uma melhor caracterização dos poros das argamassas em estudo foi realizado o ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio, utilizando um porosímetro “Autopore IV” da Micrometrics (Figura 3.25). Este equipamento tem a capacidade de utilizar altas e baixas pressões, em compartimentos diferentes, utilizando para isso azoto comprimido.



Figura 3.25 – Porosímetro de mercúrio Autopore IV

O ensaio decorreu no Laboratório de Análise de Microestrutura do DEC/FCT-UNL, condicionado a uma temperatura sempre inferior a 23°C, para segurança em termos de manuseamento do mercúrio. As amostras utilizadas foram fragmentos dos provetes resultantes do ensaio de resistência à compressão, que quando finalizado, foram colocados em estufa a 60°C

durante cerca de uma semana. Após este período os provetes foram colocados em sacos de plástico fechados e identificados, armazenados num compartimento fechado até à realização do ensaio.

- Procedimento de ensaio

Os provetes sofreram um desgaste de forma a conseguirem ser colocados num penetrómetro com um volume de 5 cm^3 (Figura 3.26). Terminada a preparação, as amostras de cada argamassa foram colocadas em estufa ventilada a 40°C , onde permaneceram um período mínimo de 24h.

Após ser retirada da estufa, cada a amostra foi colocada num exsicador durante aproximadamente 30 minutos, até arrefecer à temperatura ambiente. A amostra foi então pesada e colocada no penetrómetro de sólidos, cujo bordo foi envolvido com massa de selagem. De seguida foi colocada a tampa do penetrómetro e lubrificou-se a haste do mesmo. Todo o conjunto foi novamente pesado e colocado numa das portas de baixa pressão do porosímetro, dando início ao ensaio (Figura 3.27 a)).



Figura 3.26 – Aspecto das amostras para realização de determinação de porosimetria de mercúrio

Todas as massas determinadas foram inseridas no programa de cálculo intrínseco do aparelho (AutoPore 9500), fundamentais para que este calcule o volume de mercúrio introduzido em cada patamar.

Numa primeira fase o aparelho condiciona a amostra a uma pressão de $100 \mu\text{mHg}$, pressão que mantém durante 5 minutos para estabilizar. Foi então introduzido o mercúrio até ao total preenchimento da zona envolvente do provete. Iniciou-se então o processo de intrusão, subindo a pressão em 15 patamares pré-definidos entre os valores de $0,0138 \text{ MPa}$ e $0,2068 \text{ MPa}$.

Após analisada a porosimetria a baixa pressão, retirou-se o penetrómetro e determinou-se novamente a massa do conjunto. De seguida iniciou-se a análise a alta pressão, colocando o penetrómetro na respectiva porta (Figura 3.27 b)), processo que compreendeu 67 patamares de pressão de intrusão entre os valores de $0,2758 \text{ MPa}$ e $206,8427 \text{ MPa}$. Finalizada esta análise o

aparelho inicia uma fase de extrusão da pressão, utilizando 27 patamares entre os valores de 206,8427 MPa e 0,1034 MPa. Em cada patamar de pressão, foi determinado um tempo de espera de 15 segundos na análise de baixa pressão e de 30 segundos na análise de alta pressão [RATO, 2006].



Figura 3.27 – Porta de baixa pressão (a) e de alta pressão (b)) de intrusão de mercúrio

3.4.10. Caracterização térmica e mineralógica

A preparação das amostras e realização dos ensaios de caracterização térmica e mineralógica decorreu no LNEC, sendo que a preparação foi executada pelo autor do presente trabalho e os ensaios e análise de resultados foi executada com o apoio do Dr. André Gameiro, bolseiro de investigação do projecto FCT-METACAL.

As amostras ensaiadas foram retiradas dos pedaços centrais dos provetes resultantes do ensaio de resistência à compressão, que quando finalizado, foram colocados em estufa a 60°C até serem transportados, em sacos de plástico fechados, para o LNEC.

Foram preparadas 3 amostras diferentes: fracção fina para o ensaio de DRX (secção 3.4.10.1), amostra global para o ensaio de TG-DTG (secção 3.4.10.2) e um fragmento para análise ao MEV (microscópio electrónico de varrimento), ensaio este não incluído no presente trabalho por falta de disponibilidade para a sua realização.

3.4.10.1. Análise por difracção de raios X (DRX)

A difracção de raios X constitui um poderoso meio de investigação das substâncias cristalinas, uma vez que os átomos se dispõem numa rede tridimensional. Dado que as distâncias reticulares são da mesma ordem de grandeza dos comprimentos de onda da radiação X, um cristal actua como uma rede de difracção dos raios X. Esta difracção pode ser representada como a reflexão por um conjunto de planos atómicos paralelos, de acordo com a expressão da Lei de Bragg [BRAGA-REIS, 1994].

- Procedimento de ensaio

Os pedaços dos provetes resultantes do ensaio de resistência à compressão foram colocados em estufa a 60°C, onde permanecem por um período mínimo de 24h. Após serem retirados da estufa foi recolhido um pedaço do provete a preparar e este foi fragmentado, tendo o cuidado de não partir os grãos de areia, até que as partículas finas da pasta do ligante passem num peneiro de malha 106 μm . A fragmentação consistiu no esmagamento da amostra com o auxílio de um martelo de borracha, por aplicação de força sem pancadas, com o objectivo de separar o máximo possível o ligante da areia (Figura 3.28). A amostra resultante denomina-se fracção fina.

Finalizada a preparação da amostra, esta foi colocada num porta-amostras próprio do difractómetro de raios X utilizado, modelo Philips PW3710 (Figura 3.29). As condições de ensaio empregues foram tensão de 35kV e corrente de 45mA, com radiação K α de cobalto com comprimento de onda $\lambda=1.7903 \text{ \AA}$. Os difractogramas foram registados entre 3° e 74° 2 θ , com incrementos de 0,05° 2 θ por cada 1s, em efeito 0,05° 2 $\theta \text{ s}^{-1}$ [GAMEIRO *et al.*, 2012a].



Figura 3.28 – Fragmentação de uma amostra de argamassa



Figura 3.29 – Colocação da amostra em pó no porta-amostras e difractómetro Philips PW3710 utilizado no ensaio

3.4.10.2. Análise termogravimétrica e análise termogravimétrica diferencial (TG-DTG)

A análise termogravimétrica inclui-se num conjunto vasto de técnicas analíticas baseadas nas mudanças físicas e químicas que ocorrem na matéria, quando submetida a mudanças de temperatura. Nesta análise, a massa de uma substância, num ambiente aquecido ou arrefecido a uma velocidade constante, é registada em função do tempo e da temperatura.

As variações de massa que ocorrem durante o aquecimento são geralmente causadas pela libertação e remoção de substâncias no estado gasoso a partir de sólidos. Estas variações de massa são medidas e registadas por uma termobalança. Os gráficos obtidos, termogramas ou curvas termogravimétricas, apresentam a variação de massa em ordenadas e a temperatura de aquecimento em abcissas.

Os equipamentos de análise termogravimétrica permitem obter em simultâneo a curva termogravimétrica (TG) e a curva termogravimétrica diferencial (DTG). A curva DTG é a primeira derivada da curva TG. Em vez de patamares e secções descendentes, a curva DTG apresenta um conjunto de “picos” com área proporcional à variação de massa [CRUZ *et al.*, 2006].

- Procedimento de ensaio

Após permanecer um período mínimo de 24 horas numa estufa a 40°C, o provete a ensaiar foi retirado da estufa e deste recolhida uma amostra de argamassa com sensivelmente 2g. A totalidade desta amostra recolhida foi moída com o auxílio de um pilão e almofariz cerâmicos até passar totalmente num peneiro de malha 106 µm. A resultante da preparação denomina-se amostra global (Figura 3.30).



Figura 3.30 – Preparação da amostra para o ensaio TG-DTG

O ensaio foi realizado utilizando uma termobalança Setaram TGA92 (Figura 3.31) nas seguintes condições experimentais: velocidade de aquecimento uniforme de 10°C/minuto no intervalo de temperatura entre 20° C e 1000° C sob atmosfera de árgon.



Figura 3.31 – Termobalança Setaram TGA92 utilizada no ensaio TG-DTG

Nas argamassas de cal com pozolanas ocorrem geralmente perdas de massa em 3 gamas de temperatura, as quais traduzem a desidratação dos compostos hidratados formados na reação pozolânica, a desidroxilação da portlandite livre e a descarbonatação dos carbonatos presentes. O teor de portlandite livre nas amostras, é determinado a partir da perda de massa entre cerca de 400 e 550°C, enquanto a taxa de carbonatação, expressa em CaCO_3 , é obtida do teor de CO_2 medido pela perda de massa entre cerca de 550 a 850°C [GAMEIRO *et al.*, 2012a].

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

No presente capítulo serão apresentados os resultados obtidos nos ensaios realizados aos 180 dias de idade das argamassas. Por cada argamassa específica foram ensaiados três provetes, com os quais se determinou a média aritmética simples e o respectivo desvio padrão. No entanto, para argamassa CL.3 (T1) apenas foram ensaiados dois provetes e para a argamassa CL.3-2 (T10, reformulação da argamassa T1) apenas foi possível a realização dos ensaios de resistência à compressão, porosidade aberta e massa volúmica aparente, também apenas a dois provetes, visto que as argamassas se apresentaram bastante freáveis, impossibilitando a realização dos outros ensaios de caracterização, nomeadamente o de determinação do módulo de elasticidade dinâmico, resistência à tracção, absorção capilar, secagem, condutibilidade térmica, porosimetria e resistência aos sulfatos.

No Quadro 5.1, Quadro 5.2 e Quadro 5.3 são compilados os resultados de cada ensaio em termos de valores médios e desvios padrão das argamassas de cal aérea e no Quadro 5.5, Quadro 5.6 e Quadro 5.7 das argamassas de cal hidráulica natural; nos anexos A.2 a A.8 são apresentados os valores individuais por provete ensaiado.

4.1. Módulo de elasticidade dinâmico

A determinação do módulo de elasticidade dinâmico (E_d) permite indicar a rigidez das argamassas. Quanto maior for o seu valor menos deformável será a argamassa.

Na Figura 4.1 são apresentados graficamente os valores médios das argamassas de cal aérea e de cal hidráulica natural. Relembra-se que todas as argamassas CL e parte das NHL (no caso as com indicação Hc) estiveram sujeitas a cura húmida; particularmente no caso destas últimas houve uma maior dificuldade na interpretação dos resultados deste ensaio, como demonstram os elevados desvios padrão registados, devido à sensibilidade do equipamento utilizado face ao teor de humidade dos provetes.

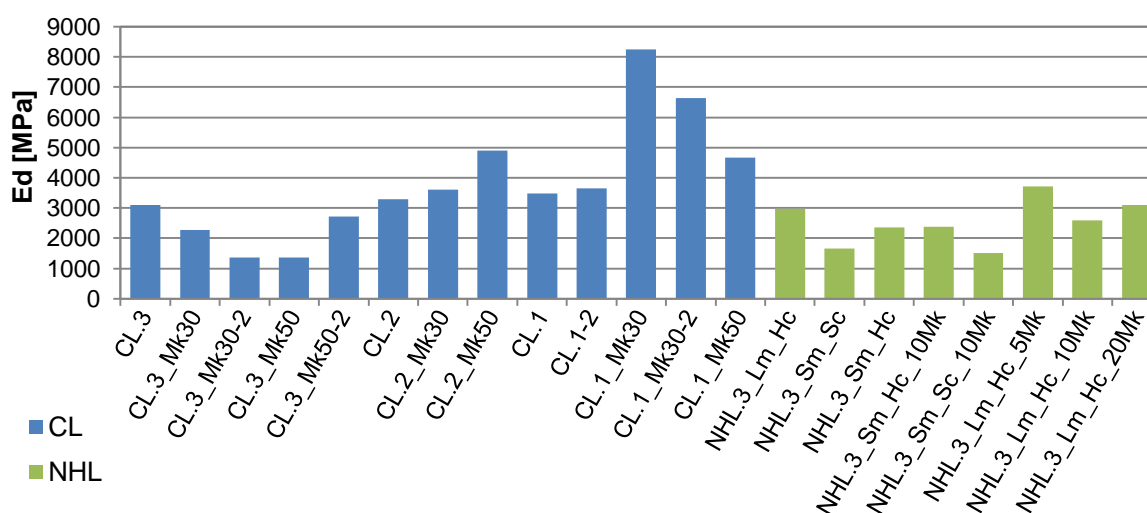


Figura 4.1 – Módulo de elasticidade dinâmico (E_d) de todas as argamassas estudadas

Analisando a Figura 4.1 verificam-se valores bastante distintos entre as argamassas. O maior e o menor valor do módulo de elasticidade dinâmico verificam-se nas argamassas de cal aérea, ambas com 30% de massa de cal aérea substituída por metacaulino, mas com traços volumétricos diferentes; o menor valor é registado no traço 1:3 e o maior valor no traço 1:1. A variação de valores nas argamassas de cal hidráulica natural não é tão significativa como nas argamassas de cal aérea. Os valores de E_d apresentados pelas argamassas NHL são da ordem de grandeza das argamassas CL com o mesmo traço volumétrico.

- Análise das argamassas de cal aérea

Na Figura 4.2 apresentam-se apenas os valores médios e desvios-padrão das argamassas de cal aérea. A argamassa reformulada com traço 1:3 (CL.3-2), sem adição da pozolana, encontrava-se muito friável à data do ensaio, o que impossibilitou a realização do seu ensaio.

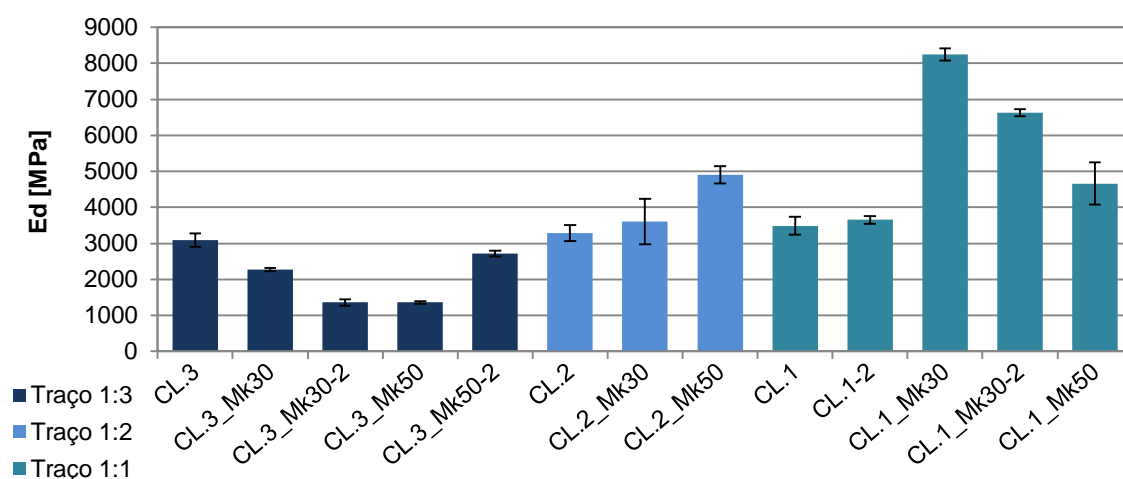


Figura 4.2 – Módulo de elasticidade dinâmico (E_d) das argamassas de cal aérea

Nas argamassas sem adição de metacaulino é possível observar um ligeiro aumento de E_d com o aumento do traço volumétrico, isto é, a argamassa CL.3 é mais deformável que a argamassa CL.2, que por sua vez é mais deformável que a argamassa CL.1.

Verificam-se variações significativas entre os resultados das argamassas que foram reformuladas com pequena variação da razão água/ligante (aumento da quantidade de água, excepto para a argamassa CL3, que teve redução), excepto na argamassa CL.1; no entanto, não se visualiza uma relação directa entre o teor de água e o E_d .

No traço volumétrico 1:3 é difícil identificar a influência do teor de metacaulino neste parâmetro. Quando é utilizada uma substituição parcial de metacaulino pela cal aérea verifica-se, sem qualquer proporcionalidade com a percentagem utilizada, uma ligeira redução no valor de E_d . O acréscimo de água nas reformulações das argamassas deste traço (CL.3_Mk30-2 e CL.3_Mk50-2) apresentou diferentes variações relativamente às argamassas originais, visto que a reformulação da argamassa com 30% de Mk registou uma diminuição no valor de E_d , e a argamassa com 50% de Mk apresentou um acréscimo da mesma propriedade.

A influência do teor de metacaulino está no entanto bem evidenciada quando a argamassa é produzida a um traço de 1:2 (ligante:agregado). A utilização de 30% e 50% de teores de substituição de metacaulino provoca um acréscimo, proporcional à percentagem de pozolana presente, deste parâmetro.

Nas argamassas só de cal CL, o aumento do traço (1:1 é mais forte em ligante que 1:2, que por sua vez é mais forte em ligante que 1:3) produz um ligeiro aumento de Ed, e, conseqüentemente, uma possível redução da deformabilidade.

O teor de substituição de 30% de metacaulino produz argamassas de cal aérea com maior Ed, quando esta é produzida a um traço 1:1, mesmo comparando com um teor de 50%.

- Análise das argamassas de cal hidráulica natural

Nas argamassas de cal hidráulica natural foi estudada a influência do tempo de amassadura, do tipo de cura e da substituição parcial de ligante por metacaulino. Para melhor avaliação e comparação entre todos esses parâmetros as argamassas de cal hidráulica natural foram distintas cromaticamente nas Figura 4.3 e seguintes.

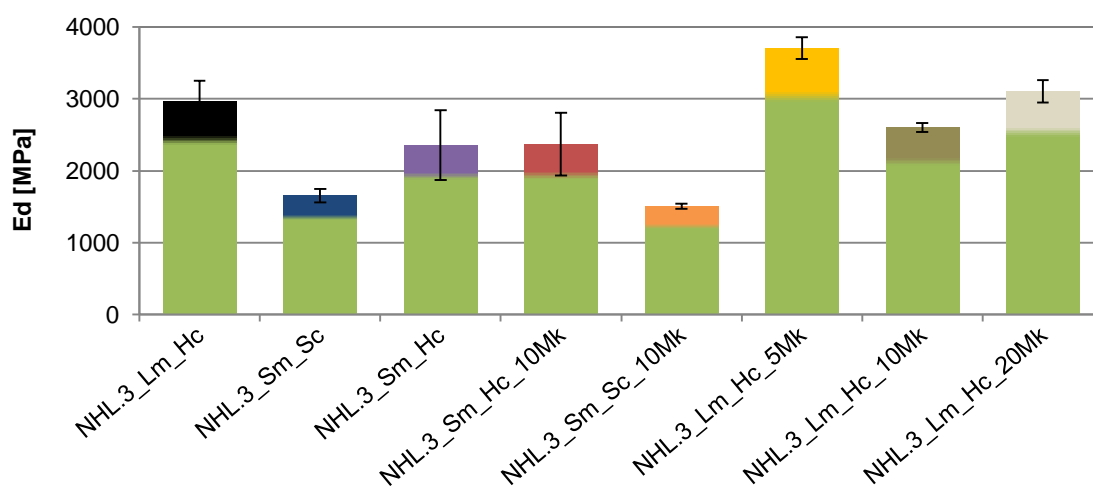


Figura 4.3 – Módulo de elasticidade dinâmico (Ed) das argamassas de cal hidráulica natural

É possível, através da Figura 4.3, afirmar que aos 180 dias a argamassa mais rígida é a com mistura longa, cura húmida e 5% de substituição de cal por Mk (NHL.3_Lm_Hc_5Mk). Verifica-se também que, de uma forma geral, as argamassas submetidas a cura húmida (Hc) apresentam maiores valores de Ed, quando comparadas às argamassas sujeitas a cura *standard* (Sc).

Esse aspecto é mais fácil de identificar na Figura 4.4 onde se verifica que as argamassas sujeitas a cura húmida (Hc) apresentam aproximadamente mais 1000 MPa de Ed relativamente às mesmas argamassas mas com cura *standard* (Sc) – entenda-se a mesma argamassa como a mesma formulação (amassadura e teor de metacaulino presente).

Verifica-se, na Figura 4.5, que o tempo de amassadura tem pouca influência no Ed. Apesar de se verificar uma ligeira descida (aproximadamente 600 MPa nas argamassas sem metacaulino e 200 MPa nas argamassas com 10% de substituição), apenas se pode afirmar que efectuar uma

mistura mais prolongada (Lm) aumenta ligeiramente o Ed comparativamente a uma mistura segundo a norma (Sm), ao fim de 180 dias de idade.

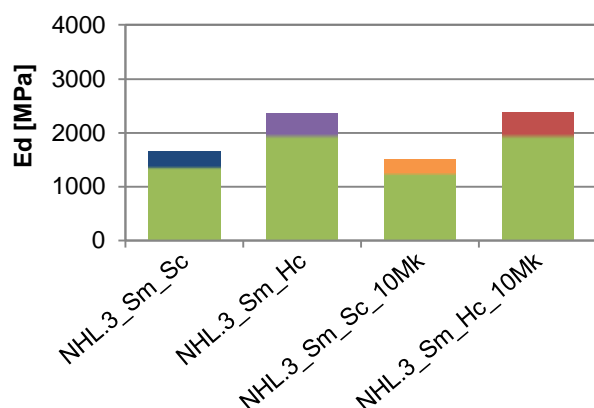


Figura 4.4 – Influência do tipo de cura nas argamassas NHL relativamente ao Ed

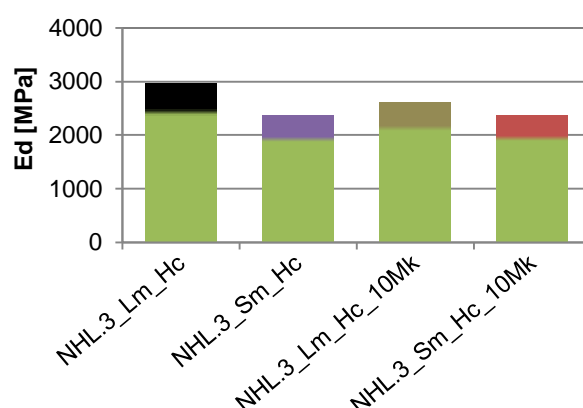


Figura 4.5 – Influência do tempo de amassadura nas argamassas NHL, relativamente ao Ed

Quanto à influência do teor de metacaulino das argamassas no Ed é possível observar, na Figura 4.6, que, com a idade de seis meses, a percentagem de 5% de substituição de metacaulino é a que apresenta valores mais elevados relativamente a este parâmetro. Apesar do acréscimo não ser significativo – cerca de 700MPa – o teor de substituição de 5% aumenta a rigidez das argamassas de cal hidráulica natural. O mesmo não se verifica para o teor 10%, onde se regista uma ligeira descida de aproximadamente 600MPa e na argamassa com 20% de substituição, onde o valor foi sensivelmente igual à argamassa sem qualquer adição de metacaulino.

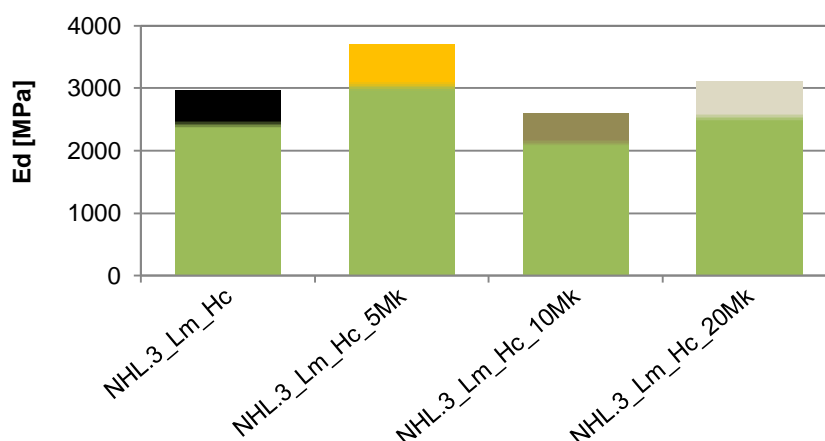


Figura 4.6 – Influência da substituição parcial de NHL por metacaulino nas argamassas, relativamente ao Ed

4.2. Resistência à tracção por flexão e à compressão

Os resultados dos ensaios de resistência à tracção por flexão (Rt) e à compressão (Rc) foram interpretados conjuntamente e são apresentados graficamente na Figura 4.7.

Como seria de esperar, é possível verificar uma relação entre os resultados de Rt e Rc, onde os valores mais elevados de Rt correspondem a valores elevados de Rc. Analisando o mesmo

gráfico é possível identificar que os valores mais baixos e mais elevados correspondem às argamassas de cal aérea de traços 1:3 e 1:1 respectivamente. As argamassas de cal aérea, realizadas a um traço volumétrico de 1:1, com adição de pozolanas, apresentam os resultados mais elevados nas duas resistências, enquanto os valores mais baixos são registados nas argamassas de cal aérea com traço 1:3 e também nas argamassas NHL5, quando sujeitas a uma cura *standard* (Sc).

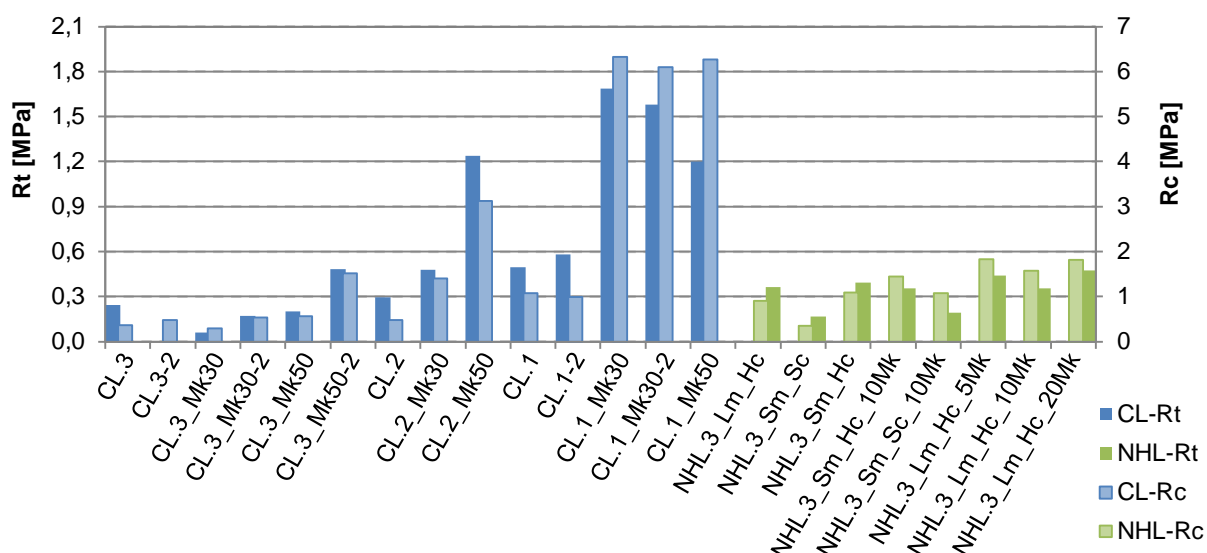


Figura 4.7 – Resistência à tracção por flexão e à compressão de todas as argamassas estudadas

- Análise das argamassas de cal aérea

Avaliando isoladamente as argamassas de cal aérea por traço volumétrico (Figura 4.8) constata-se que a adição de metacaulino, nas realizadas ao traço 1:3, não apresenta melhorias significativas das resistências mecânicas, há excepção da argamassa CL.3_Mk50-2. É importante mais uma vez referir que o estado de friabilidade da argamassa CL.3-2 impossibilitou a realização do ensaio de resistência à tracção à mesma. No entanto, nas argamassas com adição de metacaulino, a reformulação por adição ligeira de volume de água (CL.3_Mk30-2 e CL.3_Mk50-2) revelou-se importante, aumentando a Rt e Rc para o dobro. Ainda assim, a adição de metacaulino nas argamassas de cal aérea realizadas a este traço, revela-se pouco significativa nas resistências mecânicas, sendo que o teor de 30% revelou-se mesmo prejudicial.

Para argamassas de cal aérea realizadas a um traço de 1:2 é possível afirmar claramente que quanto maior for o teor de metacaulino, até 50% pelo menos, maiores são as resistências mecânicas à tracção e compressão. Verifica-se mesmo que uma argamassa de cal aérea com este traço volumétrico, com um teor de substituição de metade da massa de ligante por metacaulino, apresenta uma resistência à tracção por flexão semelhante a uma argamassa de traço 1:1, com a mesma percentagem de metacaulino.

A argamassa de traço 1:1, com um teor de substituição de metacaulino de 30% (CL.1_Mk30) apresentou os valores de Rt e Rc mais elevados, de 1,7 MPa e 6,3 MPa respectivamente. Neste caso, o ligeiro aumento do teor de água (CL.1_Mk30-2) revelou- pouco

relevante (apenas ligeiramente prejudicial). Quando 50% da massa de cal aérea é substituída por metacaulino, utilizando o traço 1:1, verifica-se um decréscimo da R_t e um valor semelhante da R_c , quando comparado com o teor de 30%. Este é assim, de entre os estudados, o teor mais benéfico nas resistências mecânicas, revelando uma melhoria de aproximadamente 200% na R_t e 500% na R_c , quando comparado com uma argamassa de cal aérea do mesmo traço (1:1), sem qualquer adição.

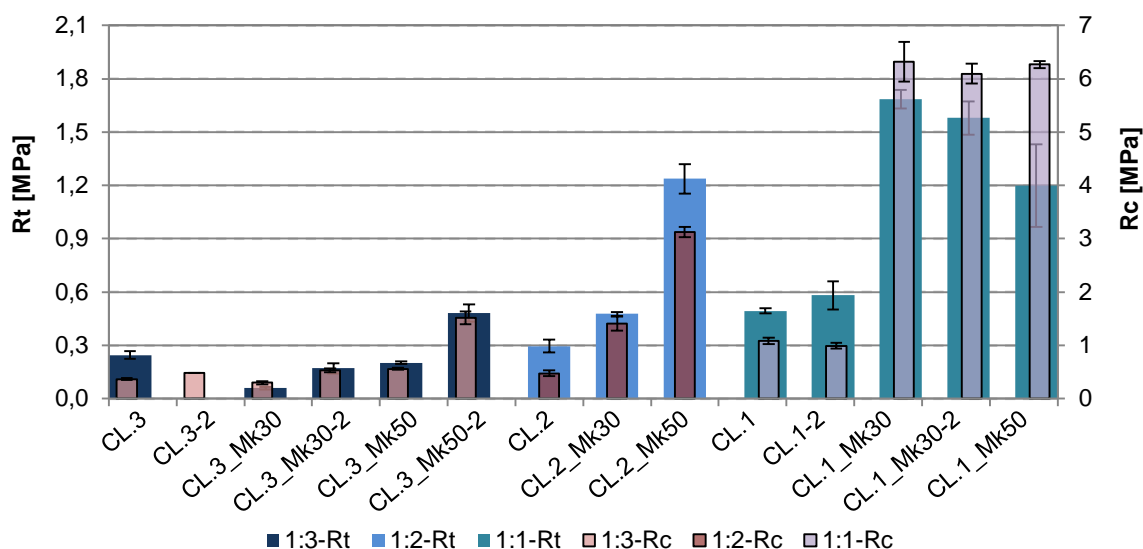


Figura 4.8 – Resistência à tracção por flexão e à compressão das argamassas de cal aérea

- Análise das argamassas de cal hidráulica natural

Na Figura 4.9 apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios de R_t e R_c , relativamente às argamassas de cal hidráulica natural.

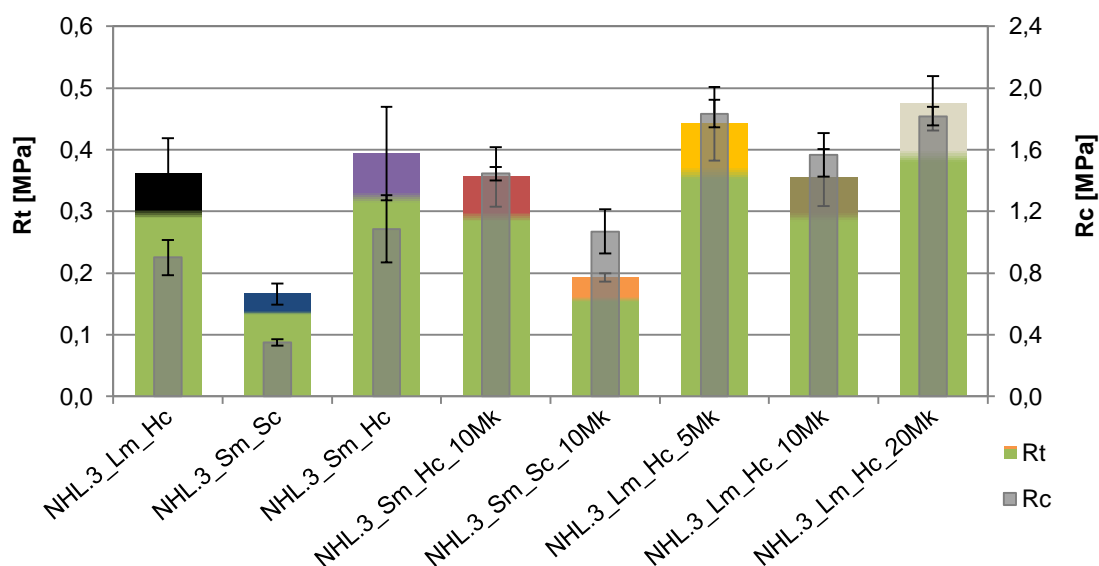


Figura 4.9 – Resistência à tracção por flexão e à compressão das argamassas de cal hidráulica natural

É possível verificar que, na R_t , os valores mais baixos correspondem às argamassas sujeitas a cura *standard* (Sc); no entanto, avaliando a R_c , a argamassa com cura *standard* e 10% de metacaulino (NHL3_Sm_Sc_10Mk) apresenta valores semelhantes às Lm_Hc e Sm_Hc. As argamassas com menores valores de R_t não correspondem assim às de menores valores de R_c .

As argamassas sujeitas a cura *standard*, apenas com cal hidráulica natural ou com adição de 10% de metacaulino, apresentam valores de R_t ligeiramente inferiores a 0,2 MPa; quando as mesmas foram condicionadas a cura húmida, verifica-se que a R_t aumentou aproximadamente para o dobro (Figura 4.10).

Relativamente à R_c confirma-se também uma melhoria quando as argamassas são sujeitas a cura húmida, que não é muito significativa quando contém 10% de metacaulino na sua constituição. Foi possível constatar que uma argamassa sujeita a cura húmida, sem qualquer adição, apresenta um valor de R_c médio semelhante a uma argamassa sujeita a cura *standard*, com 10% de teor de substituição por metacaulino.

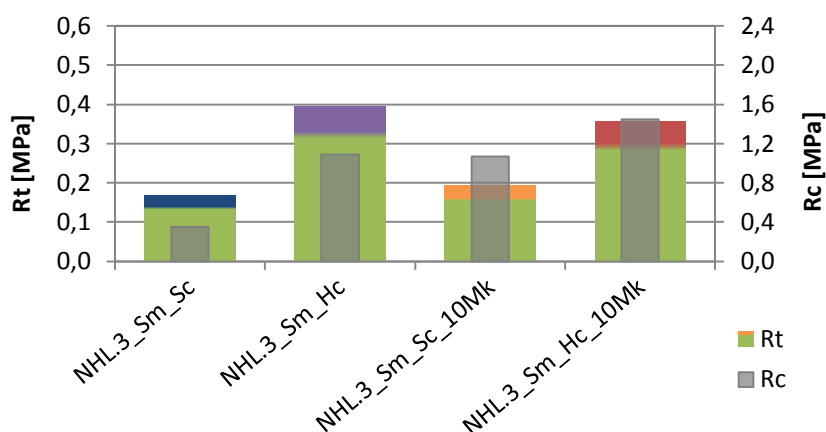


Figura 4.10 – Influência do tipo de cura nas argamassas NHL relativamente à R_t e R_c

Quanto ao tempo de amassadura, pode-se observar na Figura 4.11 que, tal como na análise ao Ed, não se verifica uma influência significativa da variação deste parâmetro nas resistências mecânicas, aos 180 dias. Apesar de um ligeiro acréscimo nas argamassas sem metacaulino, o mesmo não acontece quando é utilizado um teor de substituição de 10%, sendo mesmo possível observar nas quatro argamassas apresentadas na Figura 4.11 que os valores de R_t são todos semelhantes, com um valor aproximado de 0,37 MPa.

Na Figura 4.12, onde é avaliada a influência do teor de metacaulino, verifica-se que 5% e 20% de massa de ligante substituída por metacaulino são as quantidades mais benéficas nas resistências mecânicas (embora na R_t sejam pouco significativas), apresentando entre si valores muito semelhantes de R_t e R_c . O teor de substituição de 10% também apresentou melhorias relativamente à R_c , no entanto na R_t os resultados obtidos foram semelhantes à argamassa sem qualquer adição de metacaulino.

Verifica-se então que não existe uma relação proporcional entre o teor de metacaulino utilizado nas argamassas de cal hidráulica natural e a sua resistência mecânica.

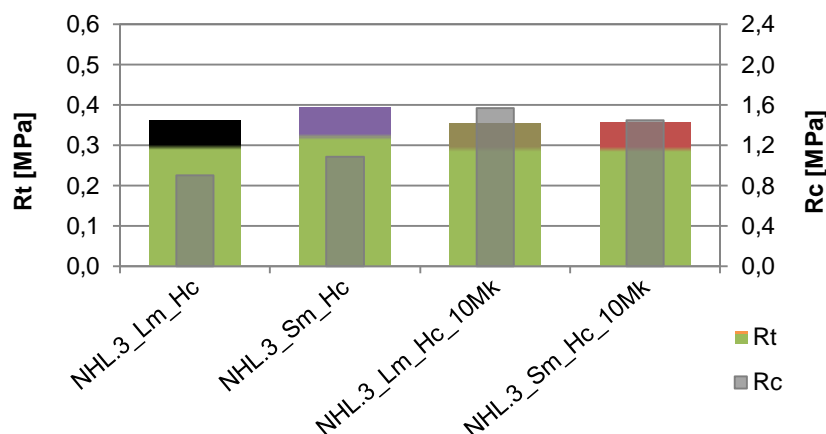


Figura 4.11 – Influência do tempo de amassadura nas argamassas NHL, relativamente à Rt e Rc

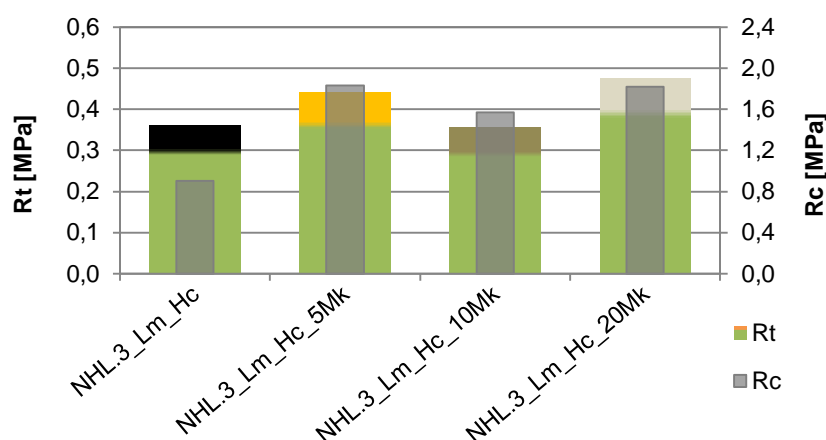


Figura 4.12 – Influência da substituição parcial de NHL por metacaulino nas argamassas, relativamente à Rt e Rc

4.3. Absorção de água por capilaridade

No que diz respeito ao comportamento face à água das argamassas, foram avaliadas primeiramente as características relativamente à absorção de água por capilaridade, segundo um fluxo ascensional. Os principais resultados obtidos no ensaio, que decorreu até às 193 horas, para além da curva de absorção capilar que permite avaliar no tempo a quantidade de água absorvida pela argamassa por área da base de contacto com a água e em função da raiz do tempo (Figura 4.13), são o coeficiente de capilaridade (CC) – declive inicial da curva de absorção que permite avaliar a rapidez da mesma – e o valor assintótico, correspondente à quantidade máxima de água absorvida pela argamassa por unidade de superfície [kg/m^2].

Tal como referido na secção 3.4.4 foram realizados dois métodos de obtenção do CC: um utilizando um método simplificado e outro por cálculo de uma regressão linear entre pontos seleccionados. Como é possível observar no Quadro 4.1 e estes valores não apresentam diferenças significativas, pelo que, posteriormente, a análise relativa ao CC será realizada apenas com os valores obtidos através das regressões lineares.

No caso dos VA assume-se que, em termos médios, os meios provetes utilizados neste ensaio apresentam volume muito semelhante.

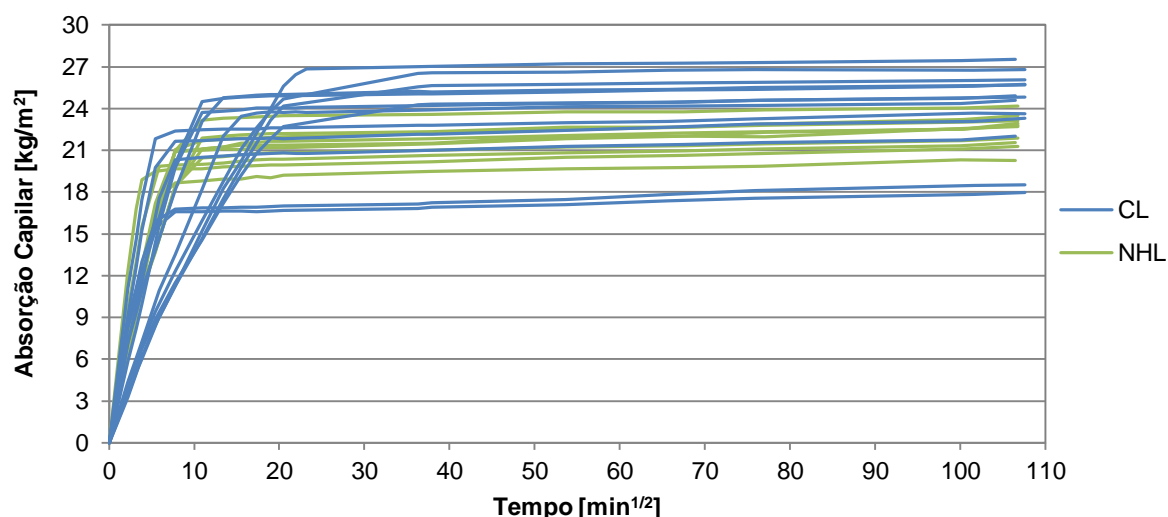


Figura 4.13 – Curva de absorção capilar de todas as argamassas estudadas

Quadro 4.1 – Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade das argamassas CL e NHL

Argamassas de cal aérea			Argamassas de cal hidráulica natural		
Designação	CC [kg/(m ² .min ^{1/2})]		Designação	CC [kg/(m ² .min ^{1/2})]	
	Met. Simpl.	Regr. Linear		Met. Simpl.	Regr. Linear
CL.3	3,46	3,54	NHL.3_Lm_Hc	3,01	2,99
CL.3-2	-	-	NHL.3_Sm_Sc	4,70	4,74
CL.3_Mk30	4,60	4,67	NHL.3_Sm_Hc	3,17	3,22
CL.3_Mk30-2	2,58	2,59	NHL.3_Sm_Hc_10Mk	2,87	2,90
CL.3_Mk50	3,30	3,37	NHL.3_Sm_Sc_10Mk	3,12	3,15
CL.3_Mk50-2	1,87	1,88	NHL.3_Lm_Hc_5Mk	2,81	2,85
CL.2	3,50	3,57	NHL.3_Lm_Hc_10Mk	2,52	2,55
CL.2_Mk30	2,94	3,00	NHL.3_Lm_Hc_20Mk	3,18	3,22
CL.2_Mk50	1,83	1,83			
CL.1	3,98	3,99			
CL.1-2	3,07	3,10			
CL.1_Mk30	1,60	1,59			
CL.1_Mk30-2	1,55	1,57			
CL.1_Mk50	1,72	1,72			

Analisando a Figura 4.13 e o Quadro 4.1 verifica-se que as argamassas de cal aérea apresentam os valores assintóticos mais elevados (CL.1_Mk30-2 com 27,4 kg/m²) mas também os mais reduzidos (CL.3 com 18,0 kg/m²). No entanto o maior declive inicial (CC) corresponde a uma argamassa de cal hidráulica natural (NHL.3_Sm_Sc com 4,7 kg/(m².min^{1/2})).

Na Figura 4.14 é mais fácil observar os aspectos referidos. É ainda possível observar que enquanto nas argamassas de cal hidráulica se verifica uma uniformização de valores de VA e CC (com excepção do valor de CC da argamassa NHL.3_Sm_Sc), nas de cal aérea existe uma maior variação entre elas.

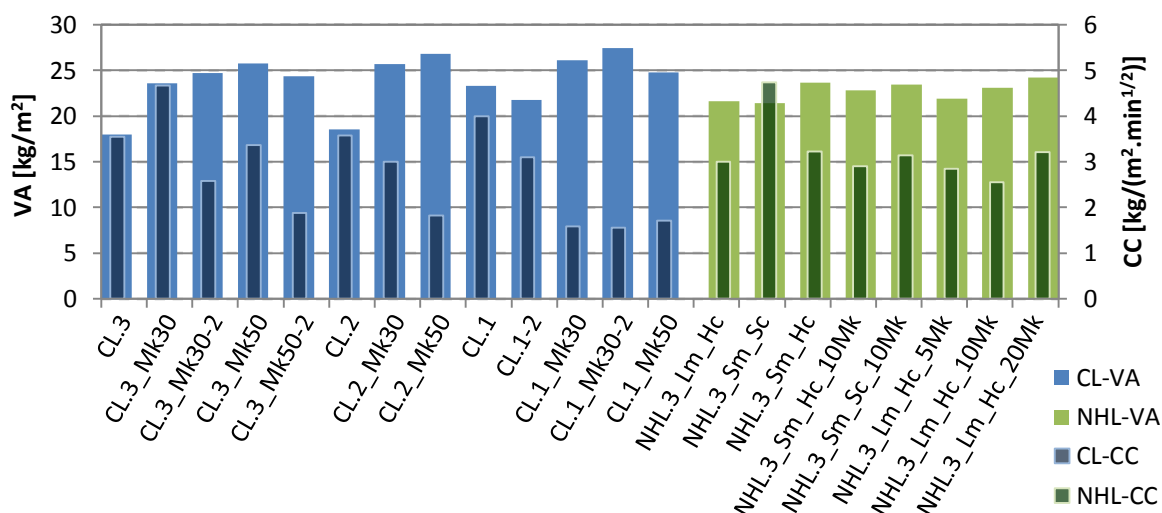


Figura 4.14 – VA e CC de todas as argamassas estudadas

- Análise das argamassas de cal aérea

Na Figura 4.15 estão representados os valores de VA e CC das argamassas de cal aérea, separados por traço volumétrico, e na Figura 4.16 apresenta-se o troço inicial das curvas de absorção capilar destas argamassas. As argamassas com metacaulino apresentaram, nos três traços volumétricos, valores mais elevados de VA e o inverso nos valores de CC (com exceção da argamassa CL.3_Mk30). Verifica-se então que as argamassas com menor velocidade de absorção inicial têm tendência a absorver maior quantidade total de água.

A reformulação das argamassas, com ligeiro aumento do teor água, reduziu significativamente o CC nas argamassas de 1:3 e na argamassa 1:1 sem metacaulino (CL.1-2). O mesmo não se verifica na quantidade de água absorvida (Figura 4.15), em que não é possível identificar um padrão quanto às reformulações das argamassas.

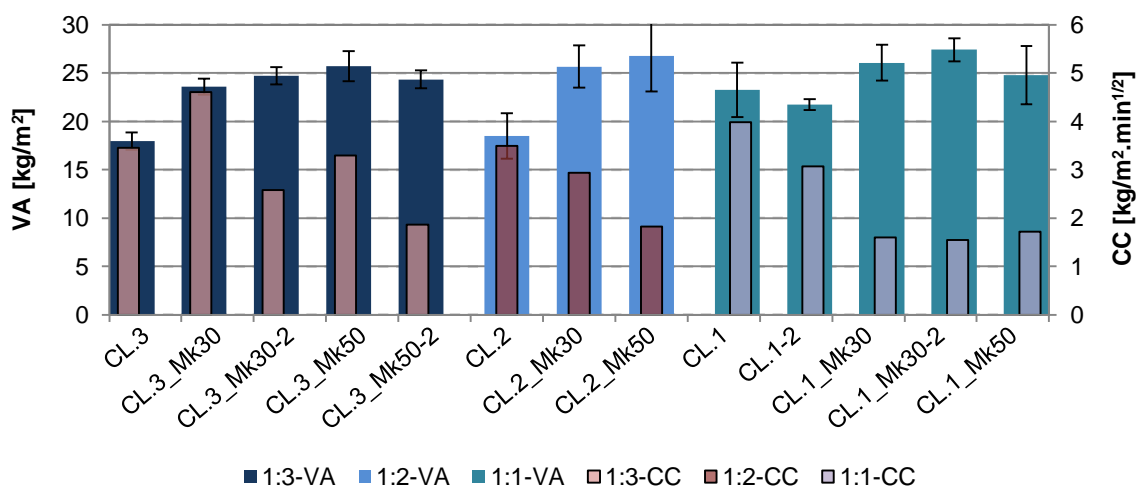


Figura 4.15 – Valor assintótico e coeficiente de capilaridade das argamassas de cal aérea

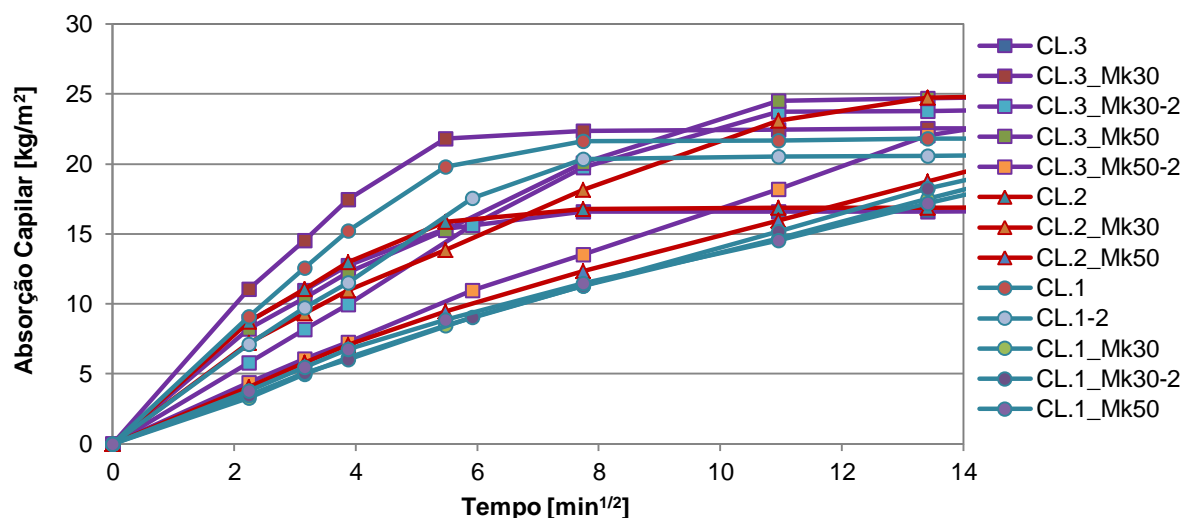


Figura 4.16 – Troço inicial das curvas de absorção capilar das argamassas de cal aérea

Enquanto no valor assintótico não é possível destacar um valor mais elevado, visto que muitas das argamassas de cal aérea apresentam valores próximos de 25 kg/m^2 , no CC é possível destacar a argamassa CL.3_Mk30 que apresentou um valor de $4,6 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{1/2})$. A sua reformulação (CL.3_Mk30-2) permitiu reduzir este valor para aproximadamente metade.

Nas argamassas com traço 1:2 e 1:1 são facilmente identificados os dois padrões referidos: a adição de metacaulino nas argamassas de cal aérea permite uma redução da velocidade de absorção inicial de água; a redução dessa velocidade inicial (CC) implica uma maior quantidade total de água absorvida (VA).

- Análise das argamassas de cal hidráulica natural

As argamassas de cal hidráulica natural foram analisadas através da Figura 4.17 e Figura 4.18.

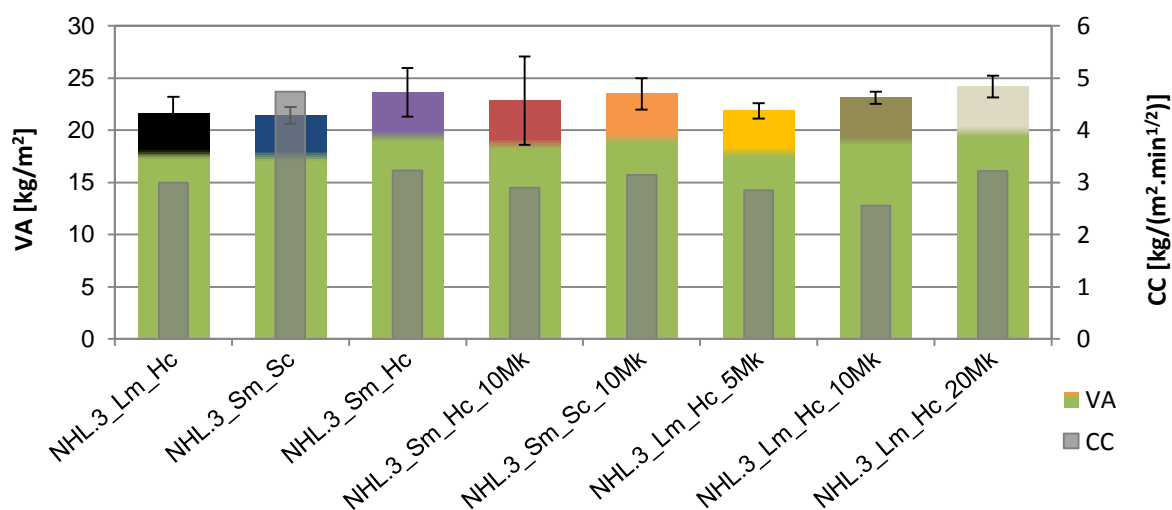


Figura 4.17 – Valor assintótico e coeficiente de capilaridade das argamassas de cal hidráulica natural

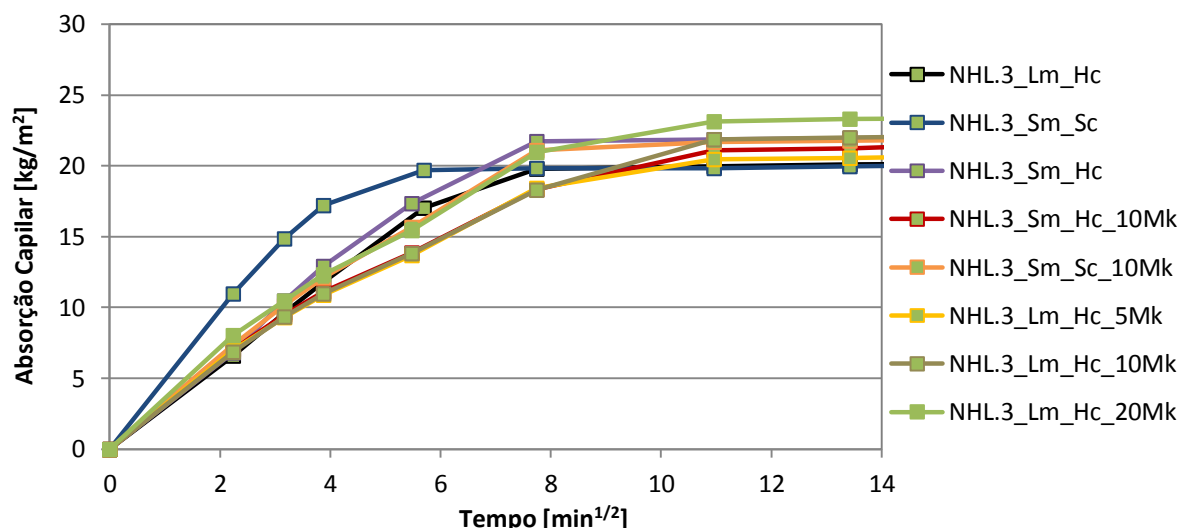


Figura 4.18 – Troço inicial das curvas de absorção capilar das argamassas de cal hidráulica natural

Tal como referido anteriormente, as argamassas de cal hidráulica natural apresentam um comportamento face à água muito semelhante entre si, com exceção da argamassa produzida sem Mk, com um tempo de amassadura e cura segundo a norma (NHL.3_Sm_Sc). Esta argamassa apresentou a maior velocidade inicial de absorção de água, mas também o menor valor assintótico.

Verifica-se então que submeter uma argamassa a cura húmida é relevante quando esta não contém metacaulino na sua composição, visto que se obtém menor CC. Consta-se ainda que a variação do tempo de amassadura não tem qualquer influência no comportamento das argamassas de cal hidráulica analisadas.

Quanto ao teor de metacaulino, é possível observar na Figura 4.19 que existe um ligeiro incremento do VA, proporcional à quantidade da pozolana utilizada nas argamassas. A argamassa com um teor de 10% de substituição foi a que apresentou um valor de CC mais baixo.

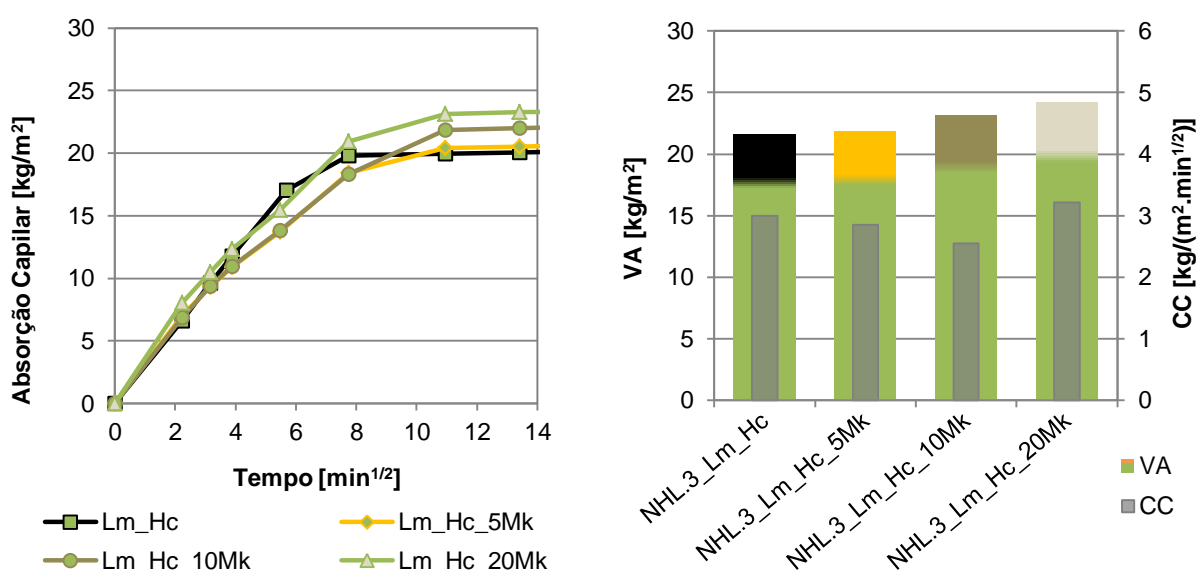


Figura 4.19 – Influência do teor de metacaulino nas argamassas NHL, relativamente à absorção de água por capilaridade

4.4. Secagem

Tal como descrito na secção 3.4.5, através do ensaio de secagem foram avaliados três parâmetros: o índice de secagem (IS), a taxa de secagem (TS) e o coeficiente de secagem (CS). O ensaio decorreu até às 863 horas. A curva de secagem de todas as argamassas estudadas é apresentada na Figura 4.20, em que se verifica um comportamento semelhante em todas as argamassas.

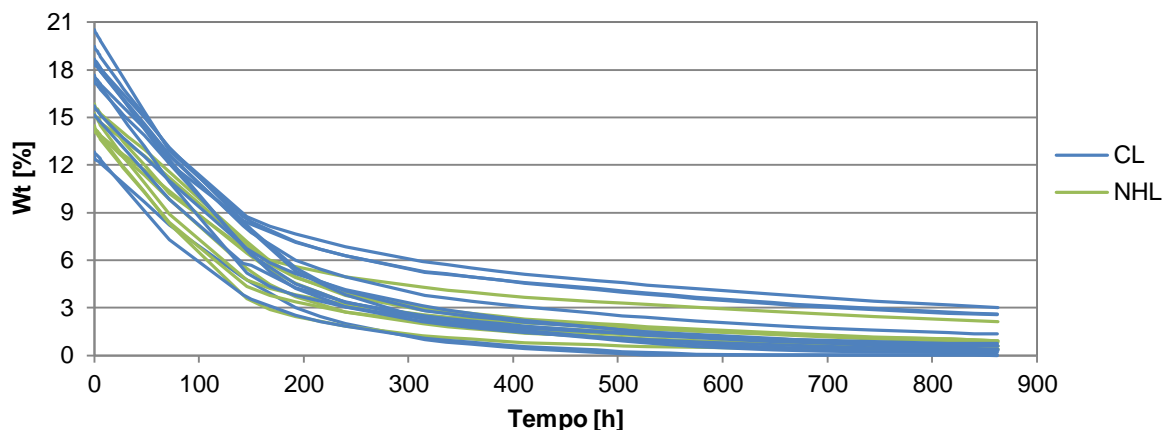


Figura 4.20 – Curvas de secagem de todas as argamassas estudadas

Para melhor interpretação dos resultados obtidos, os valores de IS e TS são apresentados graficamente na Figura 4.21. Sabendo que o IS representa o integral da curva de absorção, tal significa que argamassas com menor valor neste parâmetro têm uma maior facilidade de expulsão da humidade contida. A TS representa a velocidade inicial do processo de secagem, pelo que a secagem é mais rápida em argamassas com maior TS.

Tendo isto em conta é possível observar que, genericamente, argamassas com metacaulino têm maior dificuldade em completar a secagem (caso das argamassas CL com traço 1:1 com 30% e 50% de teores de metacaulino e a argamassa NHL com 20% da mesma pozolana na sua constituição). Verifica-se ainda que não é possível estabelecer uma relação directa entre a velocidade (TS) e a capacidade de secagem (IS).

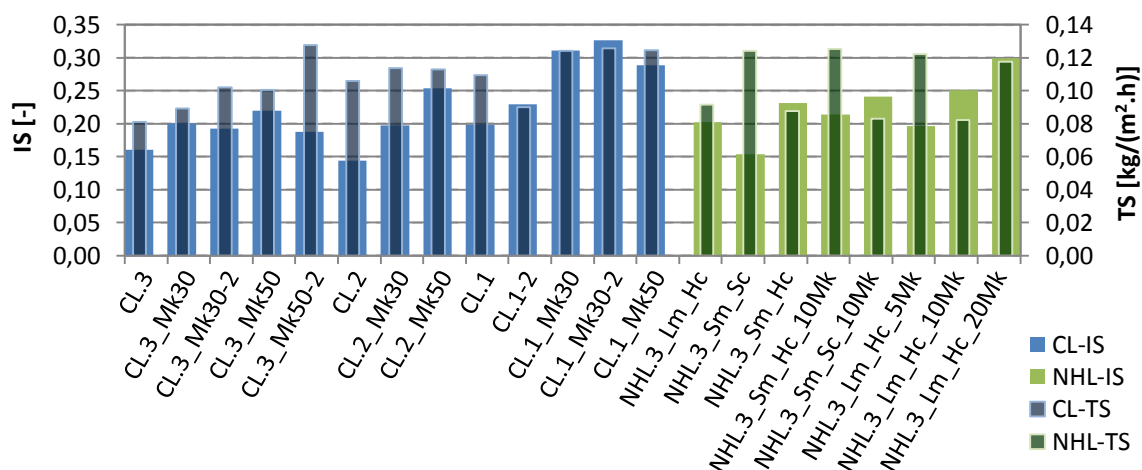


Figura 4.21 – Índice de Secagem e Taxa de Secagem de todas as argamassas estudadas

- Análise das argamassas de cal aérea

É facilmente observável na Figura 4.22 que a argamassa CL.2 é a que apresenta maior facilidade de secagem, visto ser a curva inferior ao longo do gráfico apresentado, seguindo-se da argamassa CL.3. Este facto pode ser confirmado na Figura 4.21 onde entre as argamassas de cal aérea, estas apresentam os valores mais baixos de IS: 0,14 e 0,16 respectivamente.

Analisando a Figura 4.22 com a curva de secagem das argamassas até às 300 horas de ensaio verifica-se que é possível perceber quais as argamassas com maior dificuldade em secar: as argamassas com traço volumétrico 1:1, com metacaulino (CL.1_Mk30/30-2/50), seguidas da argamassa com traço 1:2 com 50% de teor da mesma pozolana. As argamassas com metacaulino na sua constituição apresentaram, no entanto, maior rapidez de secagem inicial, como é possível observar nas argamassas CL.3_Mk50-2 e CL.1_Mk50.

Constata-se então que existe uma tendência de quanto mais forte o traço volumétrico das argamassas de cal aérea e quanto maior a percentagem de substituição de metacaulino pelo ligante, maior a sua dificuldade a secar. O inverso acontece relativamente à velocidade inicial de secagem.

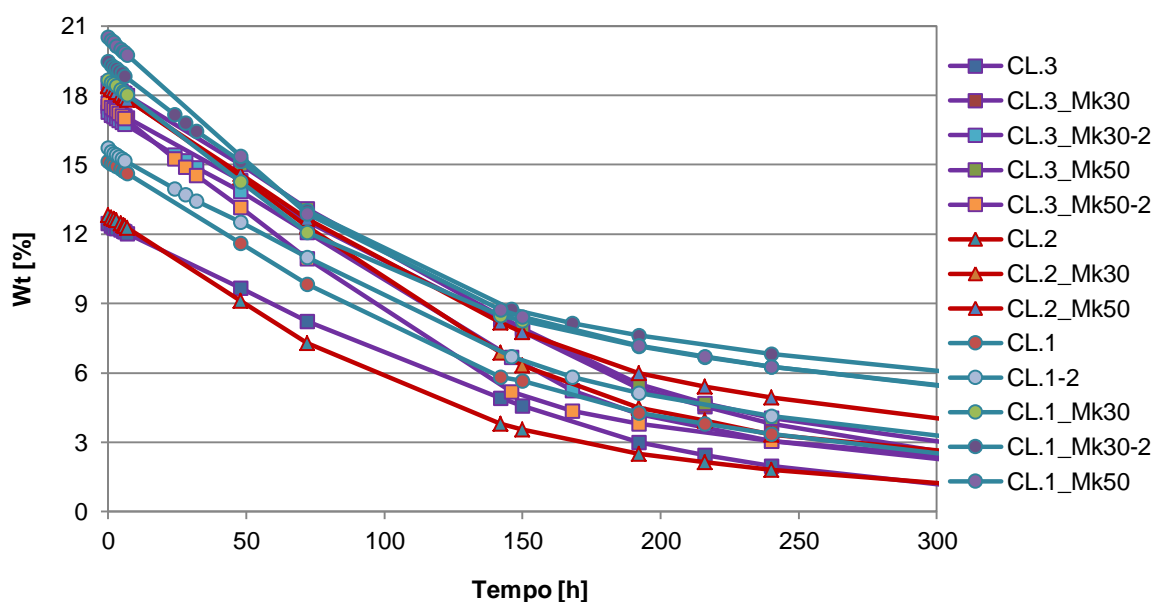


Figura 4.22 – Troço inicial das curvas de secagem das argamassas de cal aérea

Quanto ao parâmetro CS verifica-se que existe uma relação subtil entre este e a TS, como é observado na Figura 4.23; no entanto considera-se que não se revela uma ferramenta eficaz na análise do ensaio de secagem, visto que não apresenta resultados tão diferenciados como os dois parâmetros analisados anteriormente. Daí não se incluir na análise a partir deste capítulo.

Ainda assim é possível verificar que a argamassa CL.2_Mk30 e as argamassas de traço 1:3 com metacaulino apresentam uma maior facilidade de secagem na fase onde este parâmetro se inseriu. Quando às argamassas de traço 1:1 nada se pode concluir.

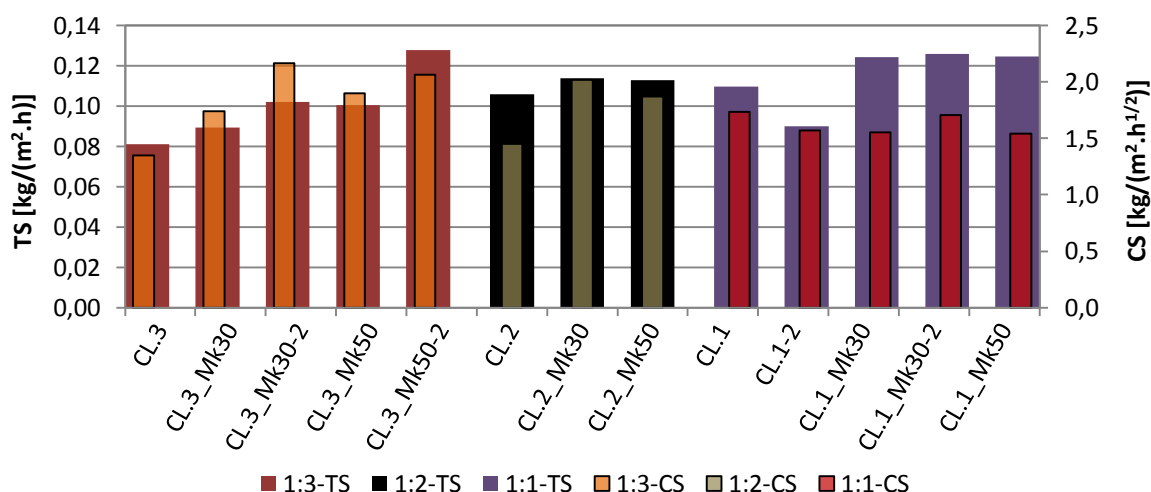


Figura 4.23 – Índice de Secagem e Taxa de Secagem das argamassas de cal aérea

- Análise das argamassas de cal hidráulica natural

Na Figura 4.24 e Figura 4.25 são apresentados os troços iniciais das curvas de secagem e os valores de IS e TS das argamassas de cal hidráulica natural.

A argamassa produzida com um tempo de mistura segundo a norma e sujeita a uma cura *standard* (NHL.3_Sm_Sc) apresentou as melhores características relativamente à secagem, entre as argamassas de cal hidráulica natural. Tanto na Figura 4.24 como na Figura 4.25 verifica-se que esta argamassa apresenta maior eficácia (IS) e rapidez (TS) de secagem.

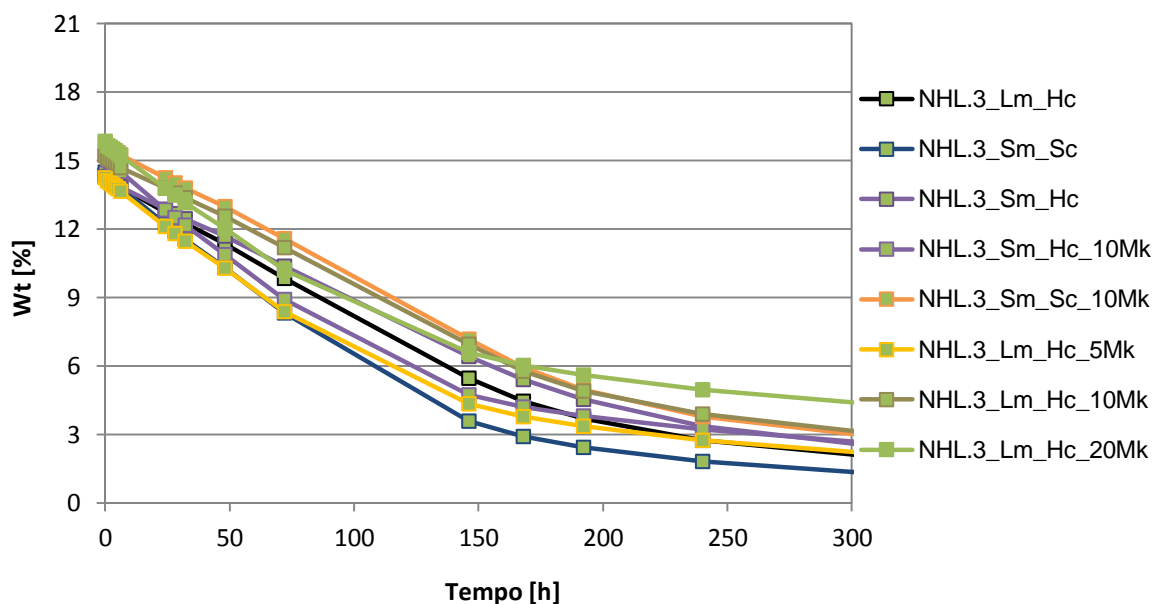


Figura 4.24– Troço inicial das curvas de secagem das argamassas de cal hidráulica natural

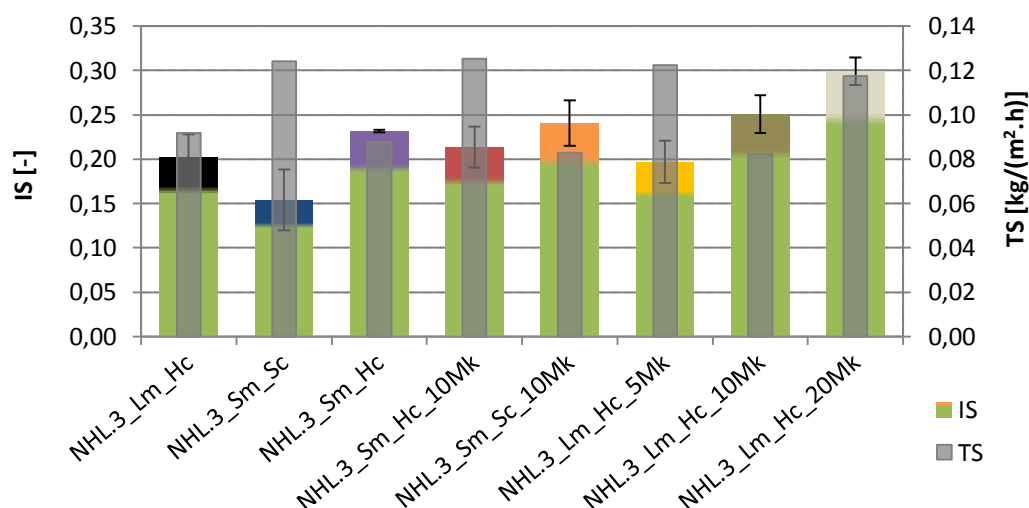


Figura 4.25 – Índice de Secagem e Taxa de Secagem das argamassas de cal hidráulica natural

A cura revela-se mesmo um aspecto fundamental no processo de secagem das argamassas de cal hidráulica natural. Na Figura 4.26 é verificado que nas argamassas sem metacaulino, as sujeitas a cura *standard* apresentam melhores características de secagem que argamassas idênticas quando sujeitas a cura húmida. O inverso acontece nas argamassas com 10% de teor de metacaulino, em que uma argamassa sujeita a cura húmida apresenta mais facilidade em secar (menor IS) e maior rapidez inicial do processo (maior TS). No entanto, a argamassa NHL.3_Sm_Sc, apesar de apresentar uma rapidez inicial semelhante à argamassa NHL.3_Sm_Hc_10Mk, revela-se mais eficiente a expulsar a humidade contida nos seus poros.

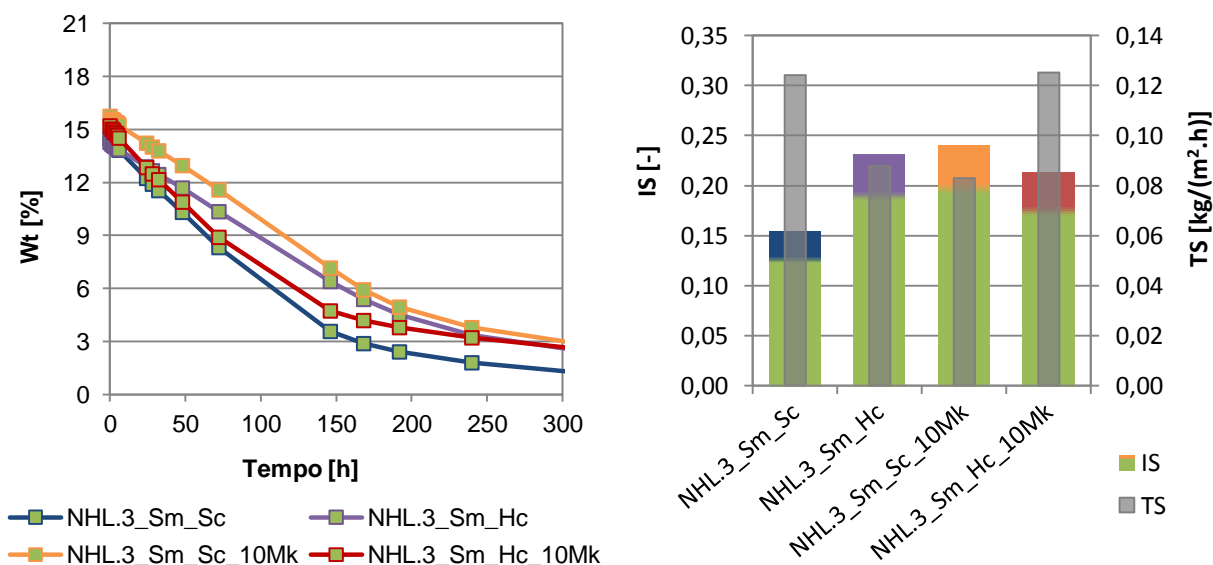


Figura 4.26 – Influência do tipo de cura nas argamassas NHL, relativamente à secagem

Quanto ao tempo de amassadura (Figura 4.27) verifica-se também comportamentos opostos quando é utilizado ou não metacaulino: nas argamassas só com cal hidráulica natural, quando produzidas com um tempo de mistura mais longo (Lm) apresentam melhores características

de secagem (menor IS e maior TS) que quando produzidas com um tempo de amassadura segundo a norma; quando a argamassa contém 10% de metacaulino, a argamassa produzida segundo um tempo de amassadura proposto pela norma (Sm), apresenta uma maior facilidade (IS) e maior rapidez inicial (TS) de secagem.

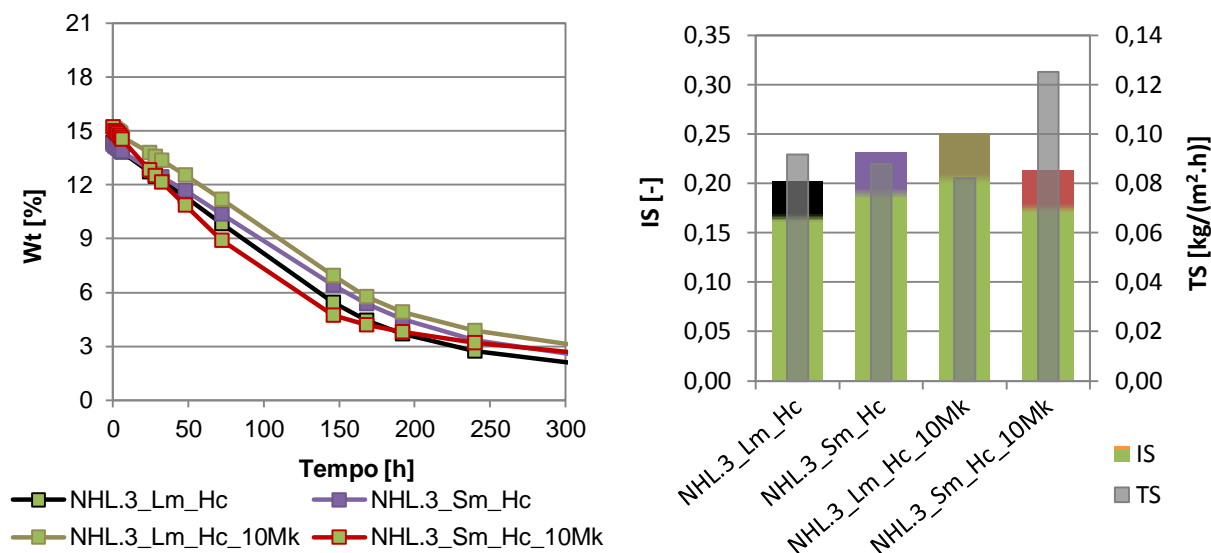


Figura 4.27 – Influência do tempo de amassadura nas argamassas NHL, relativamente à secagem

No que diz respeito à influência da substituição parcial de ligante por metacaulino verifica-se, na Figura 4.28, que há um aumento da dificuldade de secagem (IS) proporcional ao teor de metacaulino utilizado nas argamassas. A exceção é a percentagem de 5% que apresenta valores de IS semelhantes à argamassa sem metacaulino e apresenta um maior declive inicial (TS) quando comparado com a mesma.

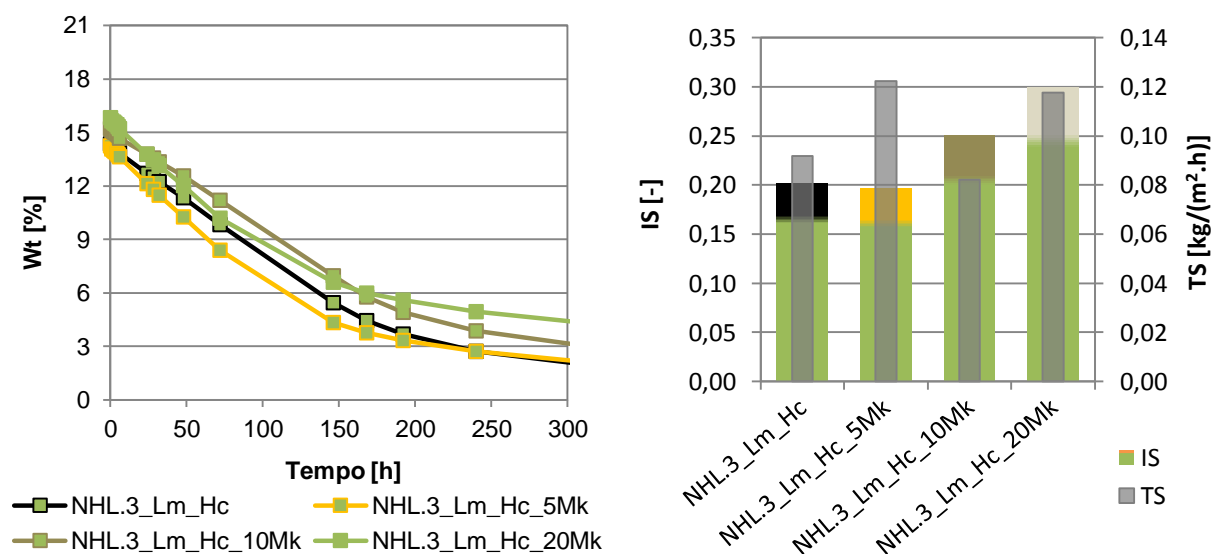


Figura 4.28 – Influência do teor de metacaulino nas argamassas NHL, relativamente à secagem

Quanto ao coeficiente de secagem (CS) não é possível retirar conclusões significativas visto que os valores são semelhantes entre as argamassas de cal hidráulica natural estudadas, o que reforça o desinteresse da sua consideração, tal como já tinha sido avaliado no caso das argamassas de cal aérea.

4.5. Porosidade aberta e massa volúmica aparente

Os resultados de porosidade aberta (Pab) e massa volúmica aparente (MVap) foram obtidos através do mesmo ensaio, pelo método de pesagens hidrostáticas. Na Figura 4.29 apresentam-se graficamente os resultados obtidos para as argamassas com os dois tipos de cal.

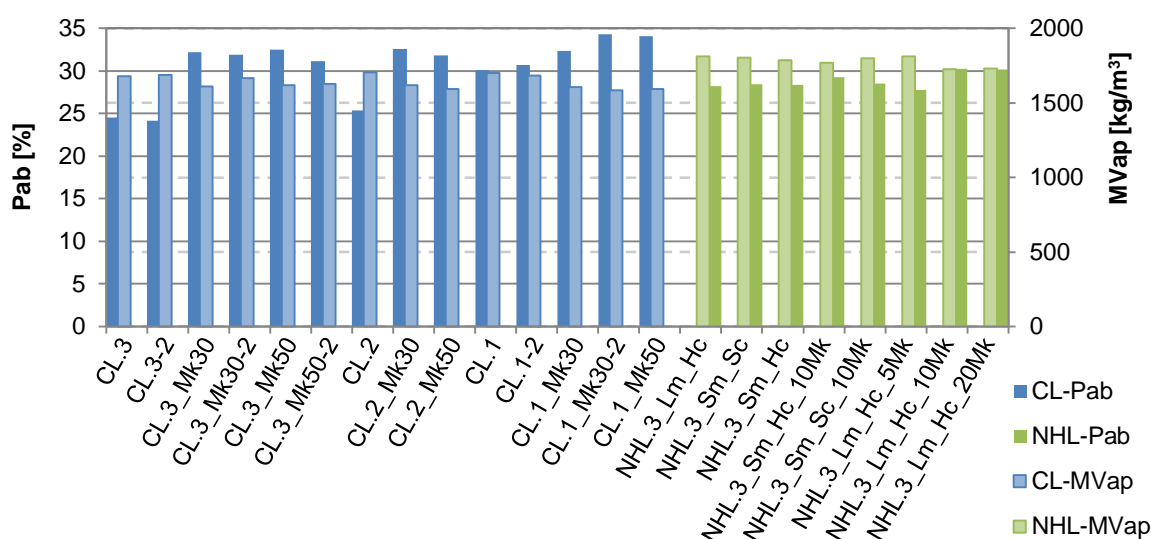


Figura 4.29 – Porosidade aberta e massa volúmica aparente de todas as argamassas estudadas

As argamassas ensaiadas, quer de cal aérea, quer de cal hidráulica natural, apresentaram entre si valores de Pab muito semelhantes, com excepção das argamassas de cal aérea sem metacaulino produzidas com traços 1:3 e 1:2, que registam valores de Pab inferiores às restantes argamassas. Quanto à MVap verifica-se ainda mais claramente uma homogeneidade de valores, não sendo possível retirar qualquer conclusão destes.

- Análise das argamassas de cal aérea

Avaliando separadamente os valores médios e desvios-padrão das argamassas de cal aérea (Figura 4.30), apenas é possível constatar que a introdução de metacaulino na sua composição aumenta o valor de Pab. Esse facto é mais facilmente constatável nas argamassas produzidas com um traço volumétrico 1:3 e 1:2, em que as argamassas sem metacaulino (CL.3 e CL.2) apresentam valores inferiores quando comparadas com argamassa que contém um teor de 30% e 50% de metacaulino na sua constituição. O mesmo acontece quando a argamassa é produzida a um traço 1:1, embora de forma mais subtil.

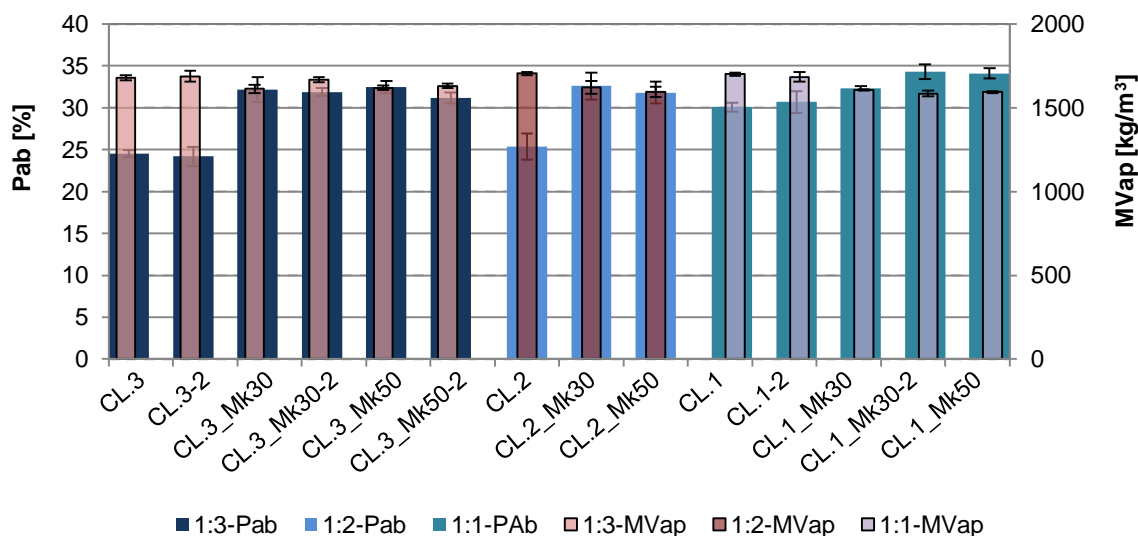


Figura 4.30 – Porosidade aberta e massa volúmica aparente das argamassas de cal aérea

- Análise das argamassas de cal hidráulica natural

Os factos anteriormente referidos também são válidos nas argamassas de cal hidráulica natural: existe uma uniformidade entre os resultados obtidos que impossibilitam retirar conclusões significativas. É igualmente possível observar um ligeiro aumento dos valores de Pab quando são utilizados teores de 10% e 20% de substituição parcial de NHL por metacaulino. Estas constatações foram retiradas pela análise da Figura 4.31, que apresenta os valores médios e desvios-padrão destas argamassas.

Esta situação demonstrou que era necessário utilizar outro método de ensaio para tentar compreender a microestrutura das argamassas, razão pela qual posteriormente se realizou a determinação da porosimetria através de intrusão de mercúrio.

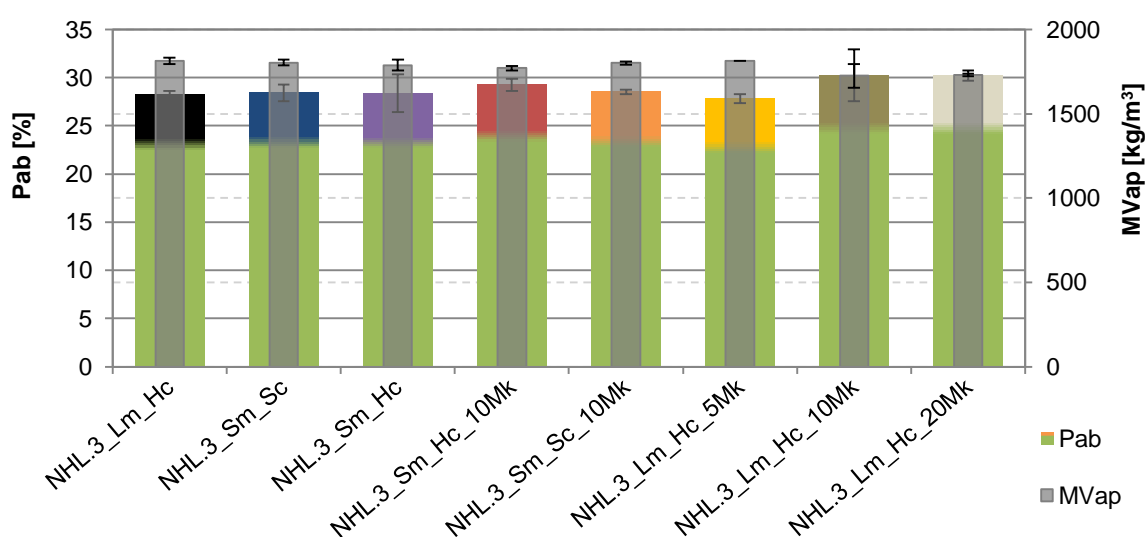


Figura 4.31 – Porosidade aberta e massa volúmica aparente das argamassas de cal hidráulica natural

4.6. Condutibilidade térmica

Na Figura 4.32 e Figura 4.33 apresentam-se graficamente os resultados do ensaio de condutibilidade térmica (λ) das argamassas de cal aérea e cal hidráulica natural respectivamente. É importante referir novamente que estes resultados não deverão ser tomados como valores absolutos mas apenas comparativos entre si, visto que a dimensão dos provetes utilizados não é compatível com o tamanho da sonda do aparelho utilizado na realização do ensaio.

Quanto menor a condutibilidade térmica da argamassa, maior a resistência térmica que, por exemplo numa aplicação em reboco, uma sua camada vai apresentar, ou seja, maior o seu contributo para o isolamento térmico global da parede.

- Análise das argamassas de cal aérea

Analisando a Figura 4.32, que apresenta os valores médios e os desvios-padrão das argamassas, é possível observar que o valor mais elevado corresponde ao da argamassa CL.1_Mk30-2 e os valores mais baixos correspondem às argamassas com traço 1:3 com 30% e 50% de teor de metacaulino.

Verifica-se que nas argamassas com metacaulino existe uma tendência para redução da sua condutibilidade térmica (com excepção da argamassa com o maior valor registado, referida anteriormente).

Com o aumento do traço (maior proporção de ligante CL+Mk) verifica-se uma tendência das argamassas aumentarem a sua condutibilidade térmica. Constata-se então que a maior presença de ligante tem tendência para agravar as propriedades térmicas da argamassa, mas que, de uma forma geral, a substituição de CL por Mk apresenta resultados benéficos relativamente às propriedades térmicas das argamassas.

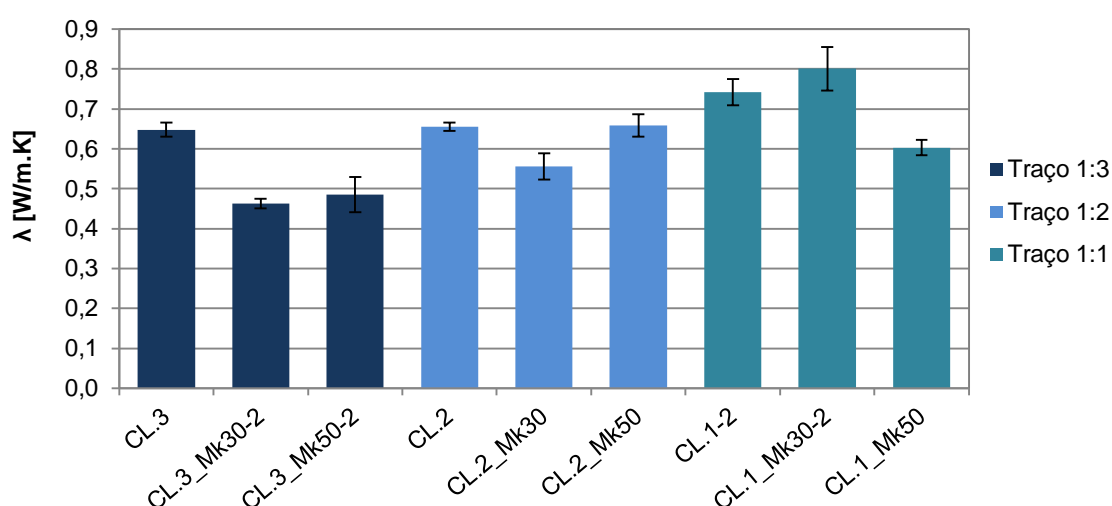


Figura 4.32 – Condutibilidade térmica (comparativa) das argamassas de cal aérea

- Análise das argamassas de cal hidráulica natural

O tipo de cura nas argamassas de cal hidráulica revela-se importante das propriedades de condutibilidade térmica. Esse facto é comprovado pela Figura 4.33 onde se verifica que as argamassas sujeitas a uma cura *standard* (Sc), cuja HR é inferior à de cura húmida (65% e 95% respectivamente), apresentam mais baixa condutibilidade térmica, independentemente da existência ou não de metacaulino. O facto de expor as argamassas de NHL a um ambiente húmido durante o período de cura parece prejudicar assim as suas propriedades de condutibilidade térmica.

Relativamente ao tempo de amassadura, verifica-se que não existe uma influência significativa na condutibilidade térmica. As argamassas sujeitas a tempos mais longos e mais curtos (Lm e Sm) de amassadura, com a mesma cura e teores de metacaulino de 0% e 10%, apresentam entre si valores bastante semelhantes, impossibilitando qualquer conclusão significativa.

Avaliando a variação do teor de metacaulino apenas se registou resultados diferenciados na argamassa com um teor de substituição da pozolana de 20%. A argamassa NHL.3_Lm_Hc_20Mk apresenta um valor de λ superior às restantes, mas também um maior valor de desvio padrão.

É possível então constatar que valores de 5% e 10% de Mk não indiciam provocar variações significativas nas propriedades de condutibilidade térmica das argamassas; no entanto, quando é utilizado um teor de substituição de 20% é verificado um ligeiro agravamento nos resultados deste parâmetro.

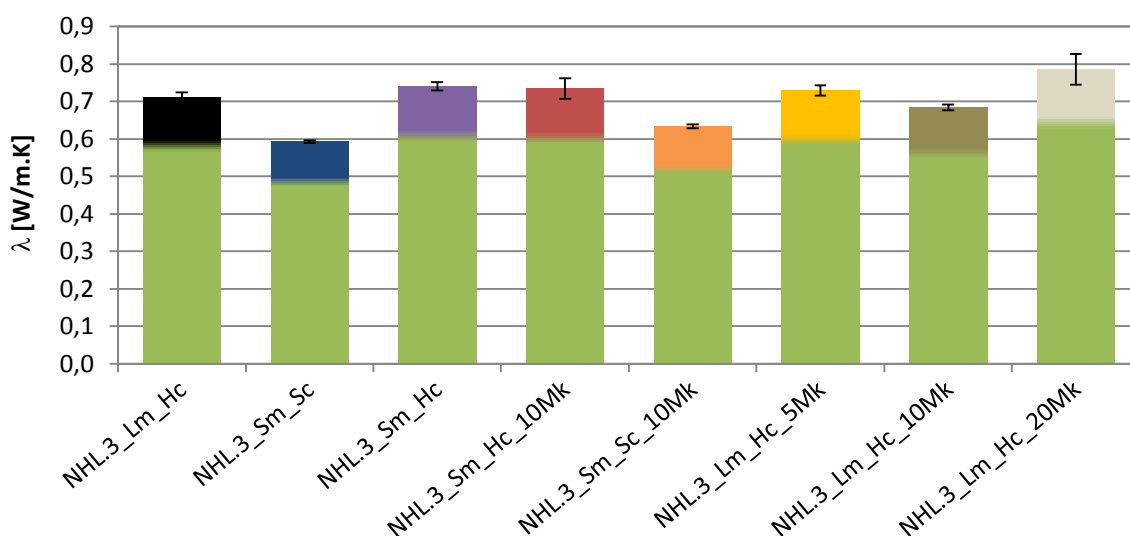


Figura 4.33 – Condutibilidade térmica (comparativa) das argamassas de cal hidráulica natural

4.7. Resistência aos sulfatos

O ensaio de resistência aos sulfatos permitiu avaliar a evolução da integridade das argamassas através da sua análise visual mas também pela avaliação da variação de massa em cada ciclo imersão/secagem. Na Figura 4.34 são apresentadas as variações genéricas de massa, em percentagem, ao longo dos ciclos. Ao fim de 20 ciclos as argamassas ensaiadas apresentaram variações de massa (Δm_{20c} [%]) bastante distintas.

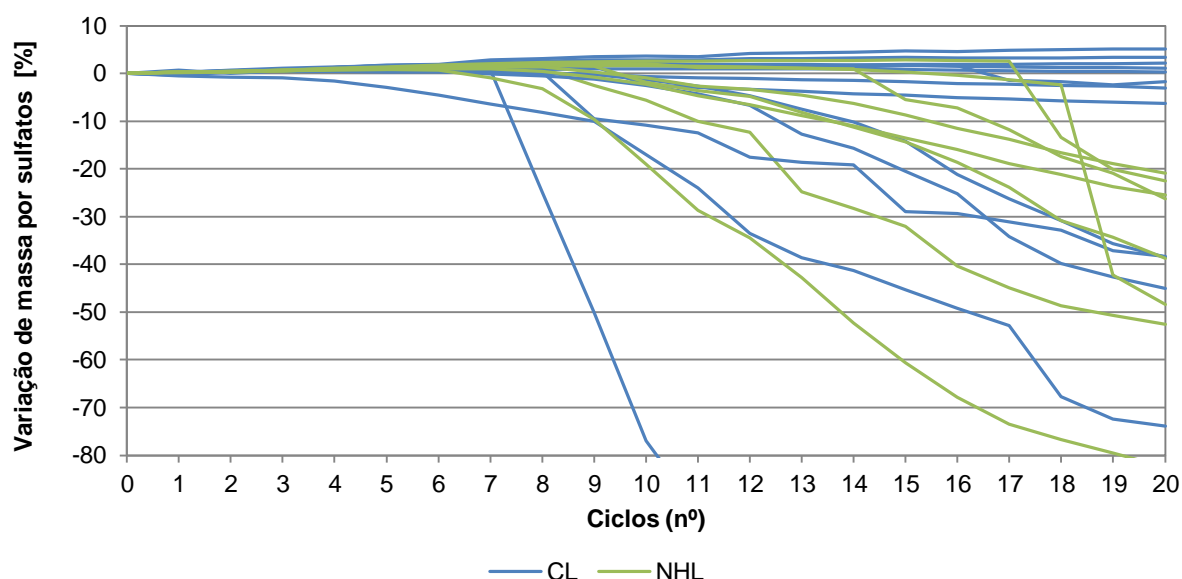


Figura 4.34 – Variação de massa (%) das argamassas estudadas, por contaminação de sulfatos

Por análise da Figura 4.34 e da Figura 4.35 verifica-se que apenas uma argamassa apresentou deterioração total (CL.1_Mk30-2). Nalgumas argamassas de cal aérea verifica-se mesmo um acréscimo de massa no final do ensaio. A expansão cristalina dos sulfatos absorvidos pelas argamassas após secagem permite que tal aconteça.

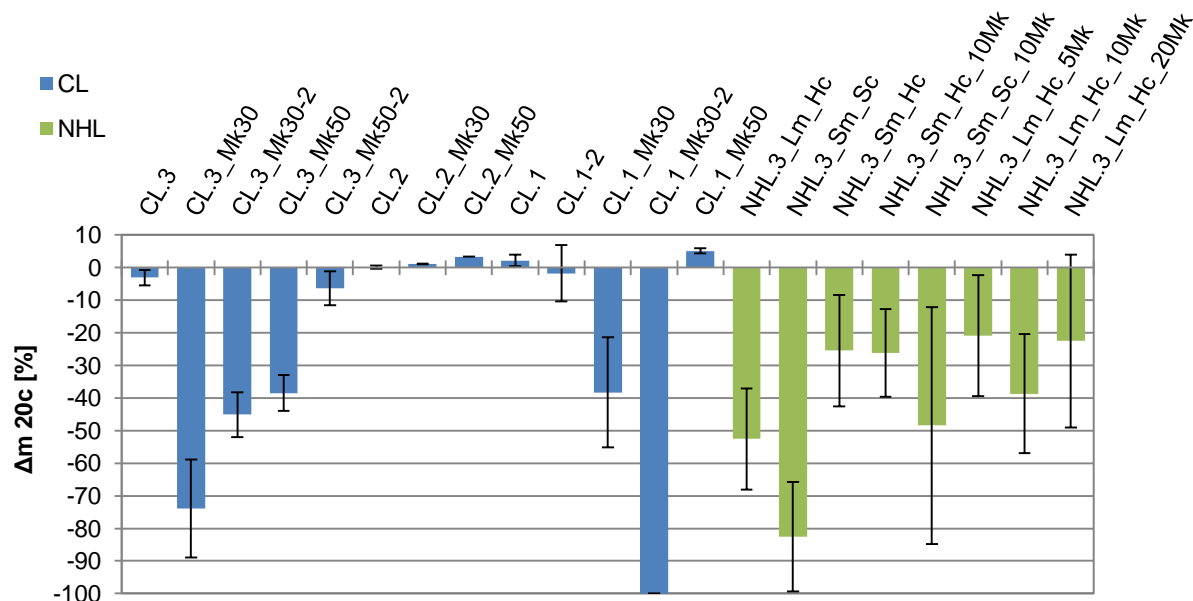


Figura 4.35 – Variação de massa das argamassas aos 20 ciclos do ensaio de resistência aos sulfatos

Aparentemente os elevados desvios padrão apresentados ao fim de 20 ciclos poderiam por em causa a validade do ensaio, no entanto estes desvios são facilmente justificados analisando individualmente os resultados dos provetes ensaiados, como por exemplo os resultados da argamassa NHL.3_Lm_Hc_10Mk, apresentados na Figura 4.36. É facilmente observável que os três provetes (J7-1, J7-2 e J7-3) apresentam uma resistência à degradação relativamente semelhante

entre si, no entanto o provete J7-3 iniciou a sua degradação ao fim de um menor número de ciclos que os restantes provetes, sendo o J7-1 o ultimo a iniciar esse processo. Em consequência disto, ao fim de 20 ciclos a argamassa NHL.3_Lm_Hc_10Mk apresenta um DP de 18,2%.

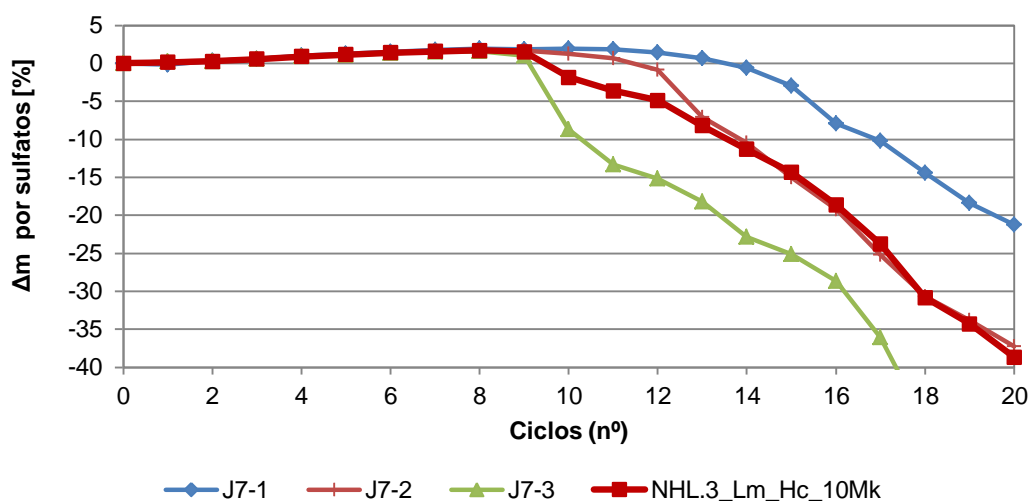


Figura 4.36 – Variação de massa dos provetes da argamassa NHL.3_Lm_Hc_10Mk, no ensaio de resistência aos sulfatos

- Análise das argamassas de cal aérea

Na Figura 4.37 a apresenta-se os resultados da variação da massa, em percentagem, obtidas para as argamassas de cal aérea nos ensaios de resistência aos sulfatos.

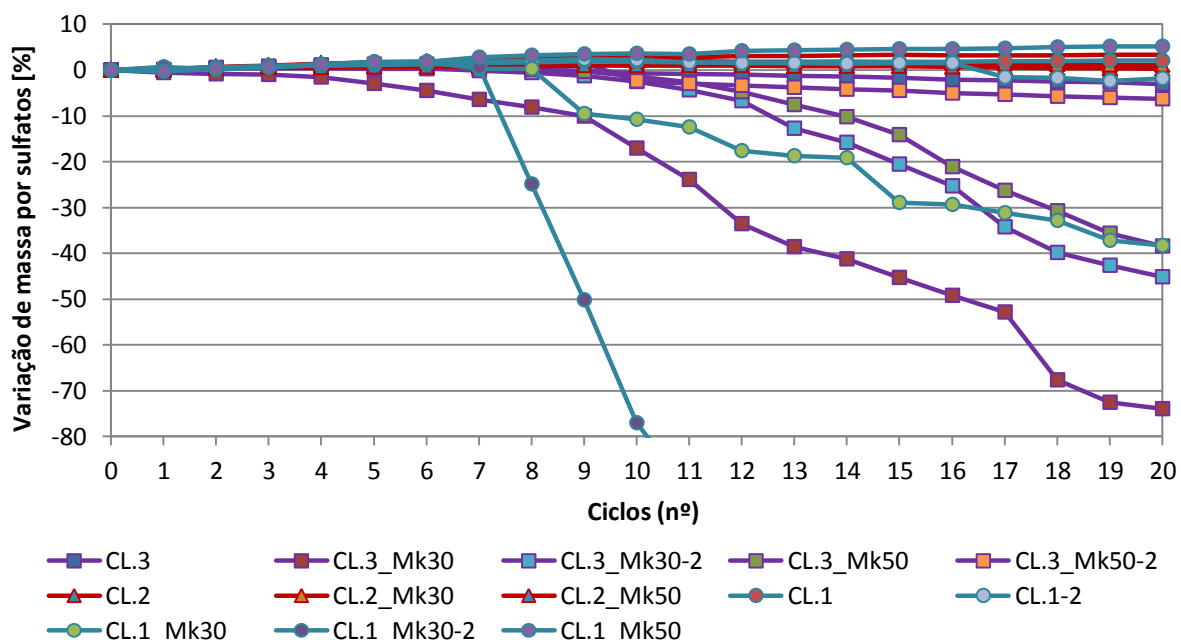


Figura 4.37 – Variação de massa (%) das argamassas de cal aérea, nos ensaios de resistência aos sulfatos

A argamassa CL.1_Mk30-2 é facilmente identificável como a única que se degradou totalmente ao longo da realização do ensaio. Esta argamassa apresentou, ao fim do 7º ciclo, evidências de rotura frágil bastante acentuadas, como é possível observar na Figura 4.38. Ao fim do 10º ciclo (Figura 4.39), a degradação desta argamassa estava tão evidenciada que um dos provetes (T14-2) apenas se apresentava com um núcleo central, enquanto os outros dois (T14-1 e T14-3) desenvolviam um processo idêntico: uma camada externa dos provetes, mais rígida, ruiu fragilmente deixando no centro uma camada de argamassa mais frágil e friável. No entanto a argamassa que apenas diferia desta por ter uma menor razão A/CL (CL.1_Mk30) demonstrou um comportamento melhor, com perda de cerca de 40% ao fim dos 20 ciclos.



Figura 4.38 – Aspecto dos provetes da argamassa CL.1_Mk30-2 ao fim de 7 ciclos



Figura 4.39 – Aspecto dos provetes da argamassa CL.1_Mk30-2 ao fim de 10 ciclos

Outras argamassas também se apresentaram bastante degradadas ao fim de 20 ciclos, como é o caso da CL.3_Mk30, com perda de massa de 74%, e um grupo de três argamassas, que no fim do ensaio apresentaram perdas de massa próximas de 40%: CL.3_Mk30-2, CL.3_Mk50 e a antes referida CL1_Mk30. Existem, ainda assim diferenças no tipo de degradação das argamassas: nas argamassas de traço 1:3 o desgaste é contínuo ao longo do ensaio, visto que os provetes são mais friáveis e menos consistentes; nas argamassas de traço mais forte, 1:1, a degradação é repentina, provocada por fendas que surgem e que se agravam ao longo dos ciclos.

Aparentemente a degradação das argamassas de traço 1:3 é provocada por um desgaste da pasta do ligante, que se dissolve na solução, aumentando a friabilidade dos provetes com o decorrer do ensaio. Em todas as argamassas ocorre ainda uma reacção química expansiva entre o ligante e os sulfatos [FARIA, 2004]. Nas argamassas com traço mais forte (1:1) esta reacção de expansão é mais intensa em consequência da maior quantidade ligante presente, provocando assim a degradação repentina e brusca das argamassas, anteriormente descrita.

As argamassas produzidas a um traço 1:2, independentemente do teor de metacaulino utilizado, apresentaram um bom comportamento ao longo de todo o ensaio. Verifica-se mesmo um acréscimo de massa de 1% e 3%, respectivamente nas argamassas com teores de 30% e 50% de metacaulino.

No entanto, quando produzidas com traços volumétricos de 1:3 e 1:1, constata-se que as argamassas com metacaulino têm um pior desempenho que as argamassas só com base em cal

aérea. Por outro lado verifica-se que o incremento do teor de metacaulino não provoca uma maior degradação das mesmas.

- Análise das argamassas de cal hidráulica natural

As argamassas de cal hidráulica natural apresentaram, de uma forma geral, um tipo de desgaste semelhante à das argamassas 1:3 de cal aérea com metacaulino: contínuo ao longo dos ciclos, provocado por uma redução da consistência dos provetes.

Na Figura 4.40 é apresentada a evolução da variação de massa das argamassas de cal hidráulica natural ao longo dos ciclos.

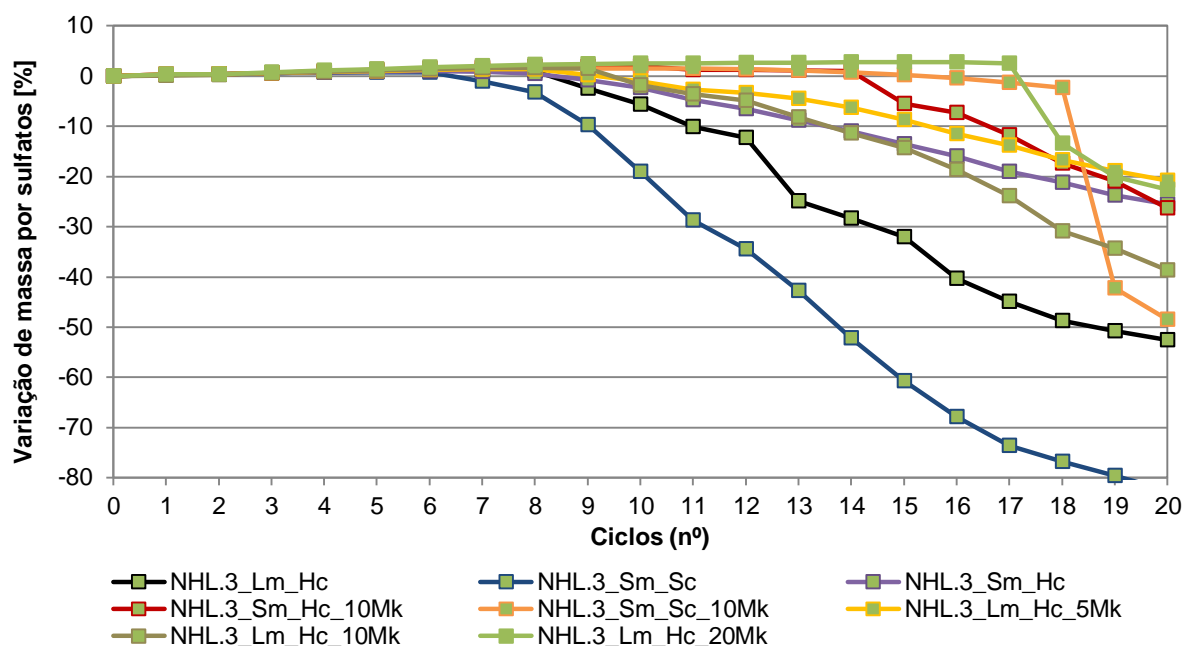


Figura 4.40 – Variação de massa (%) das argamassas NHL, nos ensaios de resistência aos sulfatos

No conjunto de argamassas de cal hidráulica natural destaca-se a argamassa NHL.3_Sm_Sc por apresentar o pior comportamento face ao ataque por sulfatos. Na Figura 4.41 observa-se o aspecto da respectiva argamassa ao fim de 11 ciclos e na Figura 4.42 ao fim de 20 ciclos (final do ensaio). Verifica-se então que uma argamassa NHL produzida com um tempo de amassadura e cura segundo a norma, apresenta o pior comportamento face aos sulfatos, entre as argamassas com o mesmo ligante estudadas.

Embora tenuemente, a argamassa NHL.3_Lm_Hc_5Mk apresentou entre as argamassas de NHL, o melhor comportamento face ao ataque de sulfatos.

Analisando as argamassas tendo em conta a influência da cura verifica-se que as argamassas sujeitas a uma cura em ambiente húmido apresentam melhor resistência ao ataque de sulfatos, independentemente da presença de Mk na sua constituição. A argamassa NHL.3_Sm_Sc_10Mk registar um bom comportamento em quase todo o ensaio, ao fim de 19 ciclos apresentou uma rotura repentina, perdendo grande percentagem de massa.



Figura 4.41– Aspecto dos provetes da argamassa NHL.3_Sm_Sc ao fim de 11 ciclos



Figura 4.42– Aspecto dos provetes da argamassa NHL.3_Sm_Sc ao fim de 20 ciclos

Quanto à influência do tempo de amassadura, analisando separadamente as argamassas NHL.3 Lm_Hc com Sm_Hc e Lm_Hc_10Mk com Sm_Hc_10Mk verifica-se que, quando produzidas com um tempo de amassadura *standard* são as que parecem apresentar melhor comportamento face à exposição aos sulfatos.

Avaliando a variação do teor de metacaulino verifica-se que não existe uma influência proporcional à quantidade de metacaulino utilizada, sendo a de 5% de Mk a que melhor comportamento apresentou. Com efeito, a argamassa sem metacaulino NHL.3_Lm_Hc apresenta a maior variação de massa ao fim de 20 ciclos, seguida das argamassas com teores de 10%, 20% e 5%, respectivamente. Apesar da argamassa NHL.3_Lm_Hc_20Mk apresentar um melhor comportamento em quase todo o ensaio, ao fim de 18 ciclos apresentou uma degradação repentina em dois dos provetes.

De uma forma geral, a utilização de metacaulino nas argamassas de NHL, de entre as estudadas, apresenta benefícios relativamente ao presente ensaio.

4.8. Porosimetria de mercúrio

O ensaio de determinação da porosimetria por intrusão de mercúrio permitiu avaliar a estrutura microporosa das argamassas ensaiadas. Devido a limitações técnico-económicas dos projectos no qual o presente estudo se insere, apenas foram ensaiadas as argamassas de cal aérea e apenas analisado um provete de cada argamassa. De entre estas, a argamassa de traço 1:3 com 30% de metacaulino (CL.3_Mk30) apresentou-se demasiado friável, impossibilitando a sua análise microporosa.

A estrutura porosa das argamassas provoca uma margem de erro associada a este ensaio. A existência de poros de maiores dimensões, que apenas são acessíveis através de poros menores, é traduzida em resultados que não correspondem à realidade, sendo necessária uma interpretação prudente dos mesmos.

“Considerando que a pressão necessária para a intrusão dos poros menores é superior à que seria exercida para os poros maiores, estes últimos serão representados como tendo uma dimensão equivalente à dos primeiros. É pois razoável assumir que os resultados da porosimetria de mercúrio apresentam valores de diâmetro de poros inferiores aos que na verdade existem” [RATO, 2006].

A Figura 4.43 representa a intrusão cumulativa e a Figura 4.44 a intrusão incremental, em percentagem do volume total de mercúrio que foi introduzido. Verifica-se, em ambas as figuras, que as argamassas sem metacaulino apresentam uma maior quantidade de poros de maior dimensão. Constatou-se ainda que os traços mais fracos em ligante apresentam maior quantidade de poros de maior dimensão, tendo por base as duas primeiras intrusões de mercúrio que correspondem aproximadamente a diâmetros de poros de 109 e 72 μm . Este facto pode ser associado à razão $A/(CL+Mk)$ que diminui quanto mais forte em ligante é o traço (Quadro 3.5).

É possível confirmar, na Figura 4.45, a grande quantidade de poros de maiores dimensões nas argamassas de traço 1:3 e 1:2 só de cal aérea e a elevada discrepância em relação às argamassas com metacaulino na sua constituição. As argamassas CL.2_Mk50, CL.1_Mk30-2 e CL.1_Mk50 apresentaram, aparentemente, as microestruturas de poros mais finos.

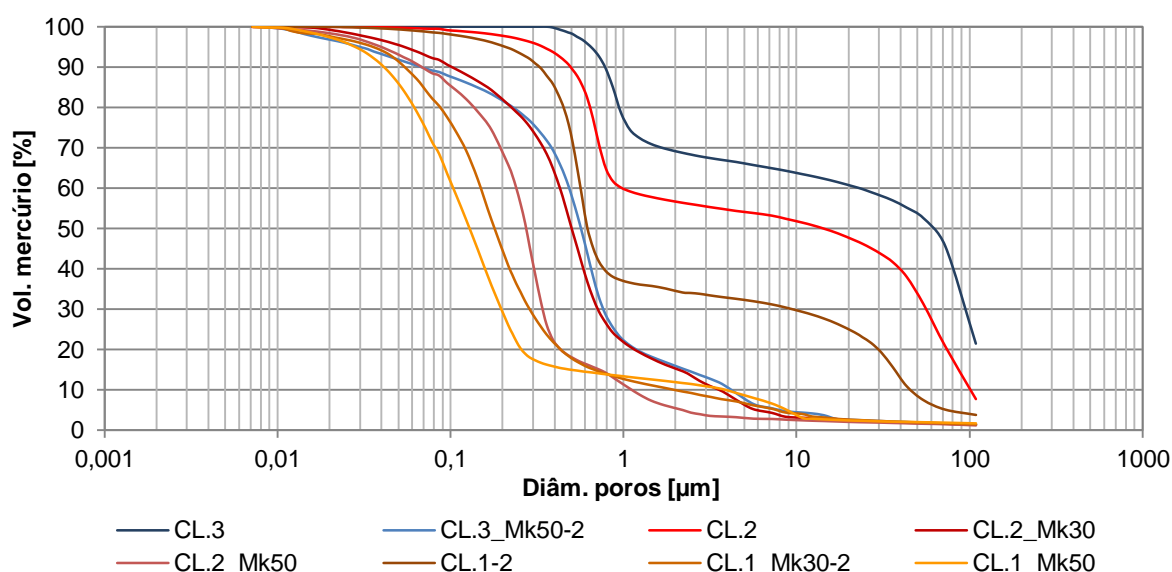


Figura 4.43 – Curvas de intrusão cumulativa de mercúrio das argamassas de cal aérea

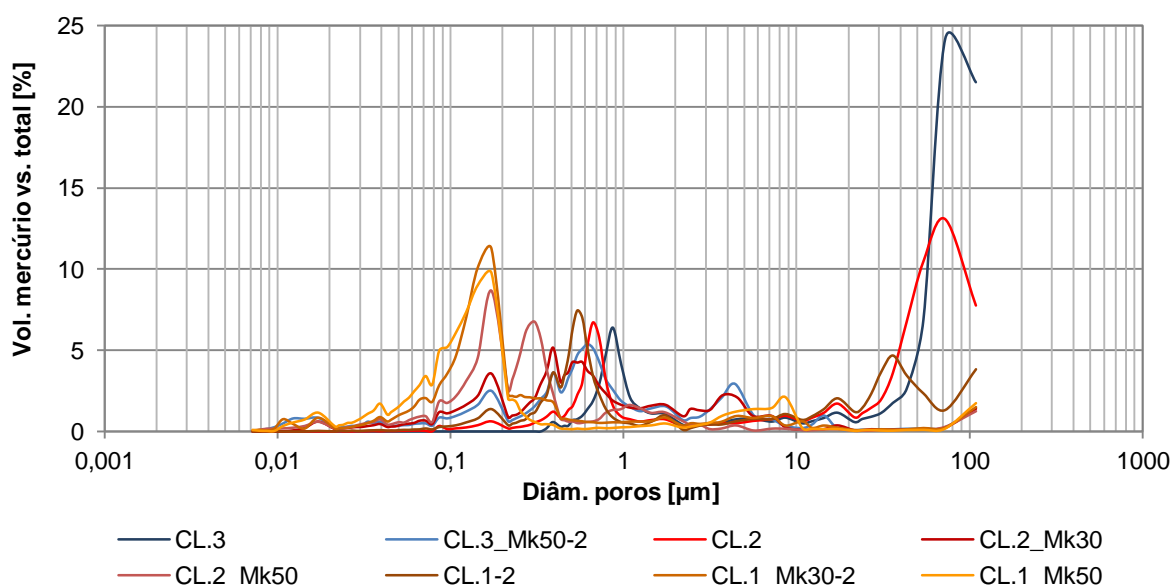


Figura 4.44 – Curvas de intrusão incremental de mercúrio das argamassas de cal aérea

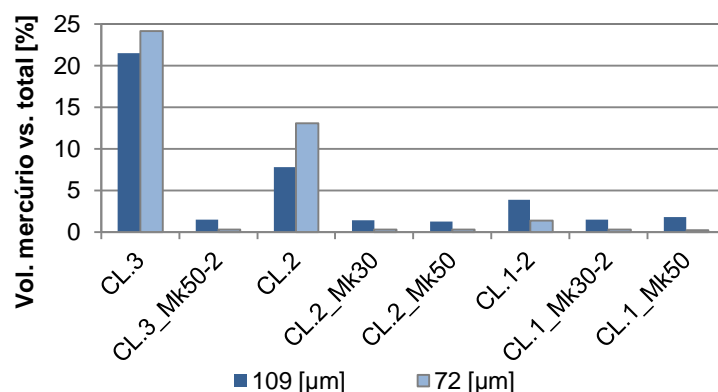


Figura 4.45 – Percentagem de mercúrio introduzido nas duas primeiras intrusões

- Análise das argamassas de cal aérea com traço 1:3

Na Figura 4.46 encontram-se representadas as curvas de intrusão cumulativa e incremental de mercúrio das argamassas de cal aérea com traço volumétrico 1:3. A argamassa CL.3 apresenta, como referido, uma grande quantidade de poros de diâmetros 109 e 72 µm, representando 46% do total de poros preenchidos por mercúrio. Para além destes diâmetros, a argamassa CL.3 apresenta uma outra dimensão característica de poros de diâmetro aproximado de 0,9 µm.

Por sua vez, a argamassa CL.3_Mk50-2 apresenta uma estrutura microporosa mais homogênea, verificando-se no entanto uma maior quantidade de poros de menor dimensão com 0,6 µm de diâmetro. Esta maior quantidade observada de poros mais finos pode significar duas situações distintas: existe efectivamente uma maior quantidade de poros com estas dimensões ou, mais provavelmente, existem poros de maiores dimensões que apenas são acessíveis por estes poros mais finos [RATO, 2006].

Constata-se assim que a presença de metacaulino tem uma elevada influência na estrutura porosa das argamassas de cal aérea, quando produzidas com um traço 1:3, visto que a razão A/(CL+Mk) é igual nas duas (Quadro 3.5).

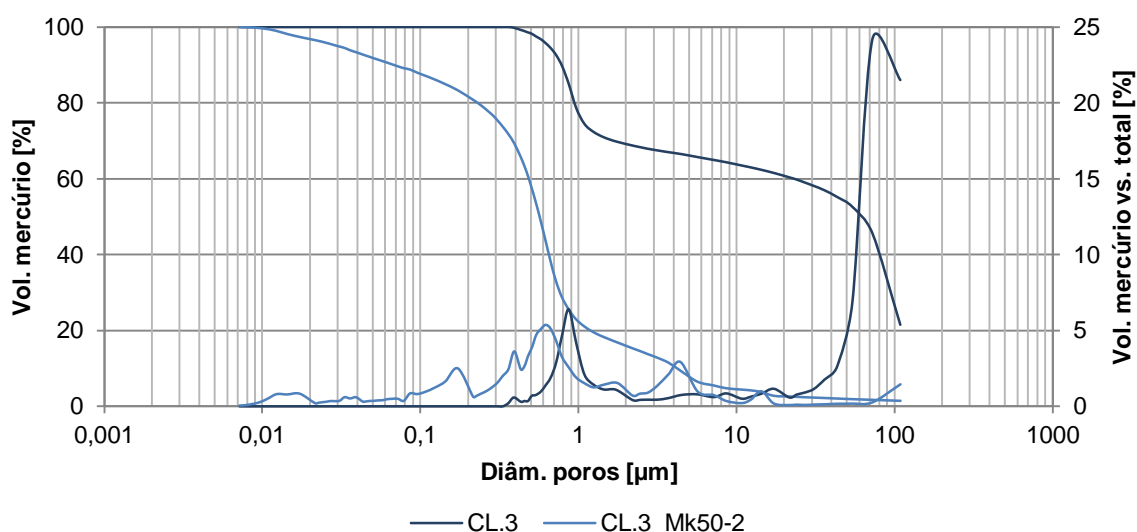


Figura 4.46 – Porosimetria de mercúrio das argamassas com cal aérea com traço 1:3

- Análise das argamassas de cal aérea com traço 1:2

As curvas de intrusão cumulativa e incremental de mercúrio das argamassas de cal aérea com traço volumétrico 1:2 são representadas na Figura 4.47. A argamassa CL.2, tal como a argamassa CL.3, apresenta uma elevada heterogeneidade na estrutura porosa, em que os diâmetros aproximados de 0,7 e 70 μm são os mais frequentes.

É novamente verificada a influência que o metacaulino tem na distribuição das dimensões dos poros. As argamassas com teores de 30 e 50% de substituição de ligante por esta pozolana apresentam uma distribuição mais homogênea de poros, verificando-se uma aparente tendência de relação proporcional entre quantidade de metacaulino e poros mais finos, isto é, a argamassa com 50% de metacaulino apresenta poros mais finos que a argamassa com 30%; visto que estas duas argamassas foram produzidas com a mesma razão $A/(CL+Mk)$ verifica-se novamente que o teor de água não influencia este parâmetro.

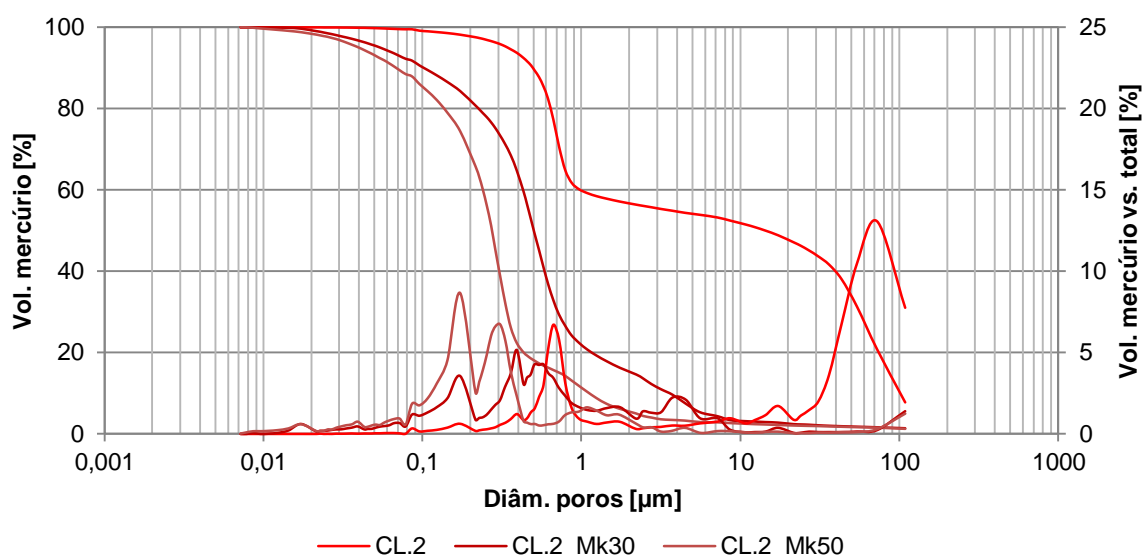


Figura 4.47 – Porosimetria de mercúrio das argamassas com cal aérea com traço 1:2

- Análise das argamassas de cal aérea com traço 1:1

Na Figura 4.48 encontram-se representadas as curvas de intrusão cumulativa e incremental de mercúrio das argamassas de cal aérea com traço volumétrico 1:1. Foi realizada, nas argamassas com traço 1:1, a análise da influência do teor de água por comparação das argamassas CL.1 e CL.1-2, sendo que na reformulação foi aumentada ligeiramente a quantidade de água adicionada; verifica-se a existência de uma estrutura microporosa bastante semelhante entre as duas argamassas.

As argamassas com metacaulino na sua constituição apresentaram, entre si, uma composição porosa bastante semelhante. Apesar da quantidade de poros com 0,17 μm de diâmetro ser ligeiramente maior na argamassa CL.1_Mk30-2 – que pode significar, como referido, que poros de maior dimensão apenas são acessíveis por poros mais finos – a argamassa CL.1_Mk50 apresenta maior quantidade de poros finos. As argamassas só de cal aérea apresentam, igualmente às CL.3 e

CL.2, apenas dois diâmetros característicos de poros, neste caso com valores aproximados de 40 e 0,5 μm .

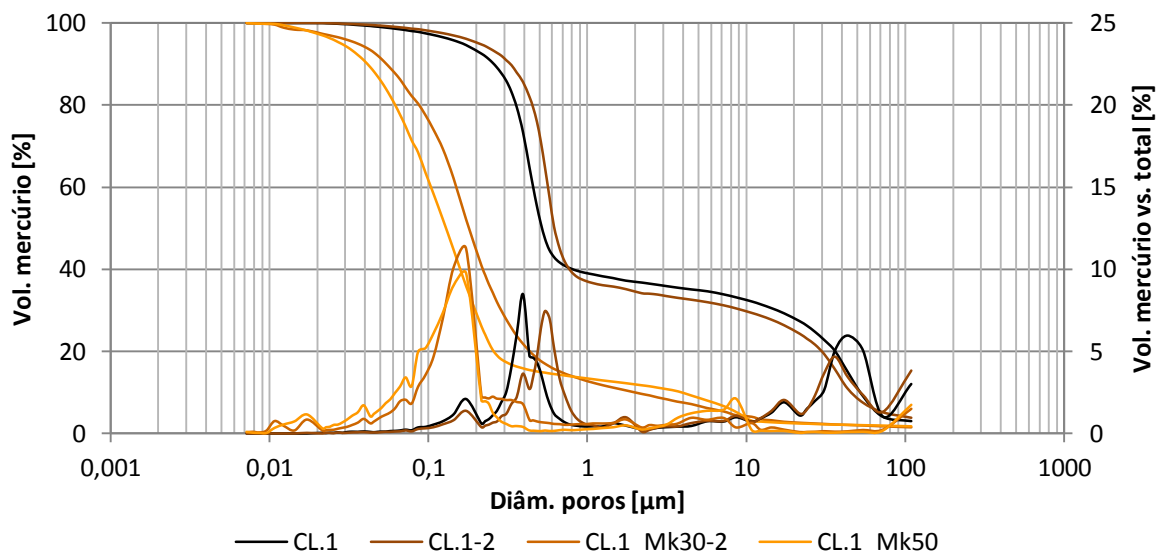


Figura 4.48 – Porosimetria de mercúrio das argamassas com cal aérea com traço 1:1

É possível assim afirmar que a adição de metacaulino, no caso de argamassas com traço 1:1, independentemente do seu teor de substituição (dos dois realizados), confere às argamassas uma estrutura porosa mais fina, tal como nas argamassas de traços volumétricos mais fracos em ligante.

4.9. Difrração de raios X e análise termogravimétrica

Com os resultados obtidos no DRX pretendeu-se identificar a composição cristalina de cada argamassa ensaiada, e assim complementar a análise mecânica e física previamente realizada. Em paralelo, pretendeu-se averiguar se aquelas propriedades já se encontram estabilizadas ou se continuarão a sua evolução com a idade.

A análise termogravimétrica e a análise termogravimétrica diferencial (TG-DTG) servem como complemento à análise de DRX, onde é possível identificar e quantificar produtos voláteis relacionados com a presença de determinados compostos característicos das argamassas de cal, em particular, dos teores de portlandite livre e de carbonatados em cada argamassa.

Apresentaram-se apenas os dados relativos à análise termogravimétrica diferencial (DTG) pela maior facilidade de interpretação dos resultados face à TG, sendo estes apresentados no anexo

Erro! A origem da referência não foi encontrada..

- Análise das argamassas de cal aérea

Nas argamassas de cal aérea foi realizada uma análise da variação do traço volumétrico e do teor de metacaulino com comparação de três argamassas por figura. Na Figura 4.49 são apresentados os difractogramas das argamassas com os traços volumétricos 1:1, 1:2 e 1:3, apenas com cal aérea.

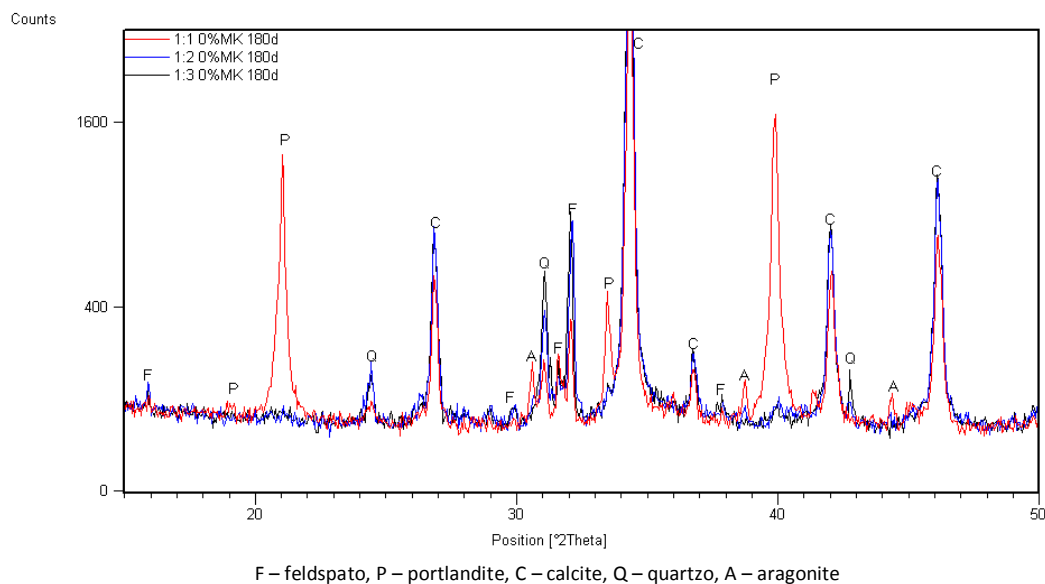


Figura 4.49 – Difractogramas das argamassas de cal aérea com traços 1:1, 1:2 e 1:3 e 0% de Mk, aos 180 dias de idade

Comparando as três argamassas de cal aérea com traços volumétricos diferentes verifica-se, aos 180 dias de idade, a presença de portlandite livre (P) na argamassa com maior teor de cal aérea (1:1), ao contrário dos traços 1:2 e 1:3, onde a carbonatação aparenta estar já completa.

O mesmo é verificado na análise termogravimétrica diferencial (DTG) (Figura 4.50) em que o único pico registado na região de desidroxilação da portlandite – entre cerca de 400 e 550°C – ocorre na argamassa de traço 1:1.

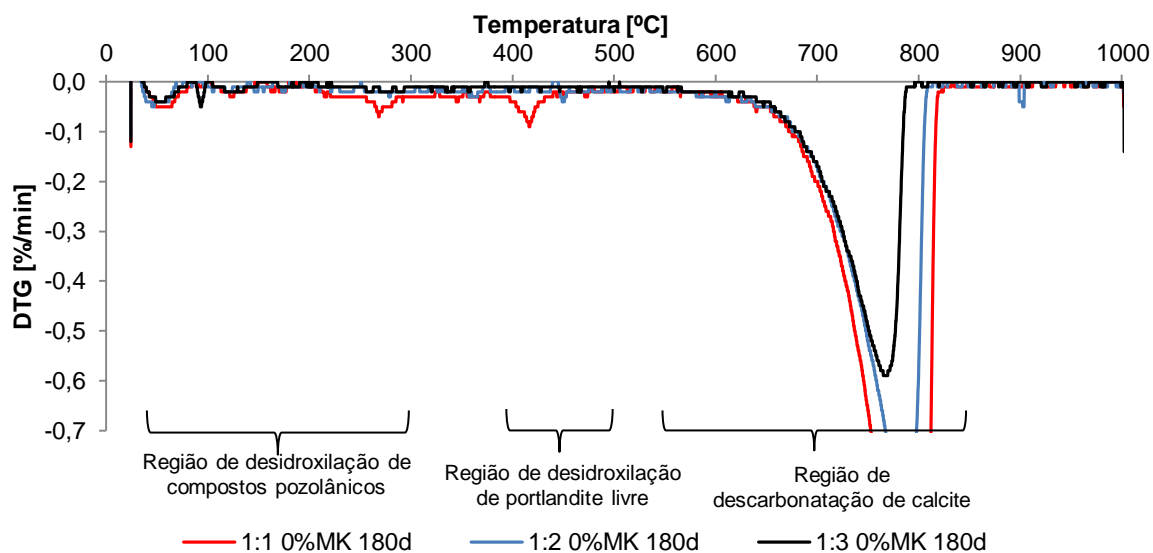


Figura 4.50 – Curvas DTG das argamassas de cal aérea com traço 1:1, 1:2 e 1:3 e 0% de Mk, com 180 dias de idade

Relativamente ao pico que evidência a presença de calcite (aproximadamente aos 750°C) observa-se que esta apresenta maior intensidade quanto maior o teor de ligante nas argamassas, verificando-se assim que a reacção de carbonatação se desenvolveu mais na argamassa CL.1-2,

apesar de ainda não estar completa aos 180 dias, ao contrário das argamassas de traço 1:2 e 1:3 sem metacaulino.

Na Figura 4.51, onde são apresentados os diagramas das argamassas de traço 1:3 com 0, 30 e 50% de Mk, verifica-se que a adição desta pozolana permite a formação de stratlingite (St), um composto resultante da reacção da cal com o Mk. O aumento do teor de metacaulino origina, consequentemente, uma maior quantidade deste composto, assim como a de polimorfos de calcite, nomeadamente vaterite (V) e aragonite (A), que se atribuem a fenómenos de precipitação/dissolução devido á acção da água. Verifica-se ainda que a quantidade de calcite (C) formada é inversamente proporcional à quantidade de metacaulino presente nas argamassas, o que está de acordo com o previsto visto que a cal aérea é substituída parcialmente pela pozolana Mk.

Ainda da análise das curvas DTG (Figura 4.52) confirma-se que quanto maior a percentagem de metacaulino utilizada nas argamassas, maior a quantidade de compostos pozolânicos presentes e menor o teor de calcite.

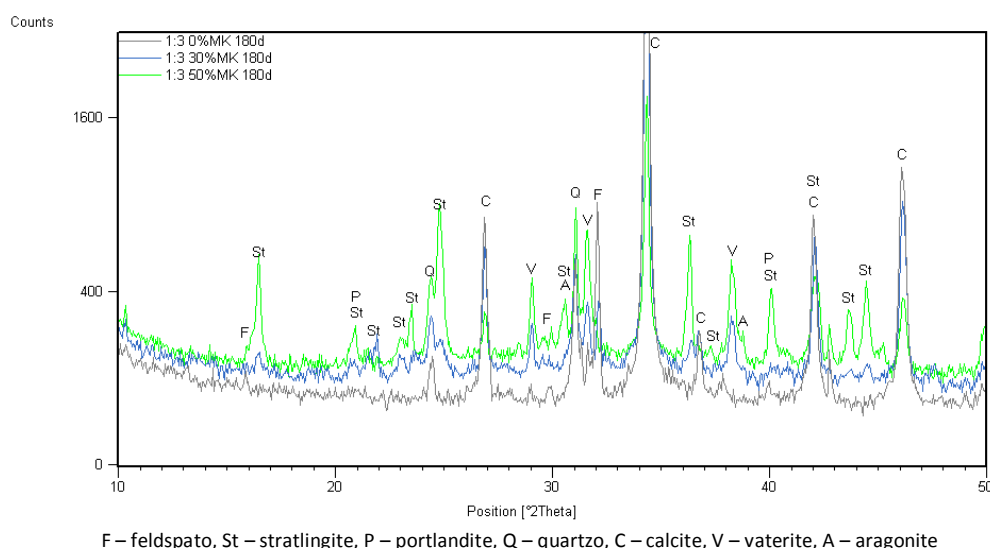


Figura 4.51 – Difractogramas das argamassas de cal aérea com traço 1:3 e 0, 30 e 50% de Mk, com 180 dias de idade

O tipo e intensidade de compostos formados nas argamassas de traço 1:2 são semelhantes às de traço 1:3. Quanto às argamassas de traço mais forte em ligante (1:1, Figura 4.53) verifica-se, na argamassa com 30% de Mk, a presença de compostos resultantes da reacção pozolânica que não se encontram presentes nas argamassas de traços mais fracos: aluminato de cálcio hidratado (D) e monocarboaluminato de cálcio hidratado (M). A stratlingite presente nas argamassas com 50% de Mk, em qualquer dos traços volumétricos, é bastante superior quando comparada com as restantes.

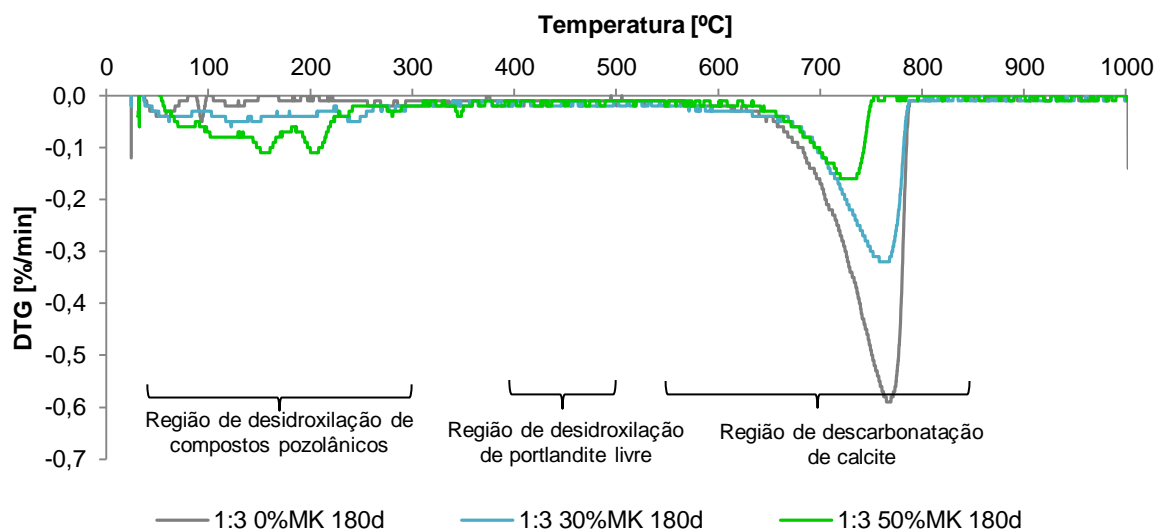


Figura 4.52 – Curvas DTG das argamassas de cal aérea com traço 1:3 e 0, 30 e 50% de Mk, com 180 dias de idade

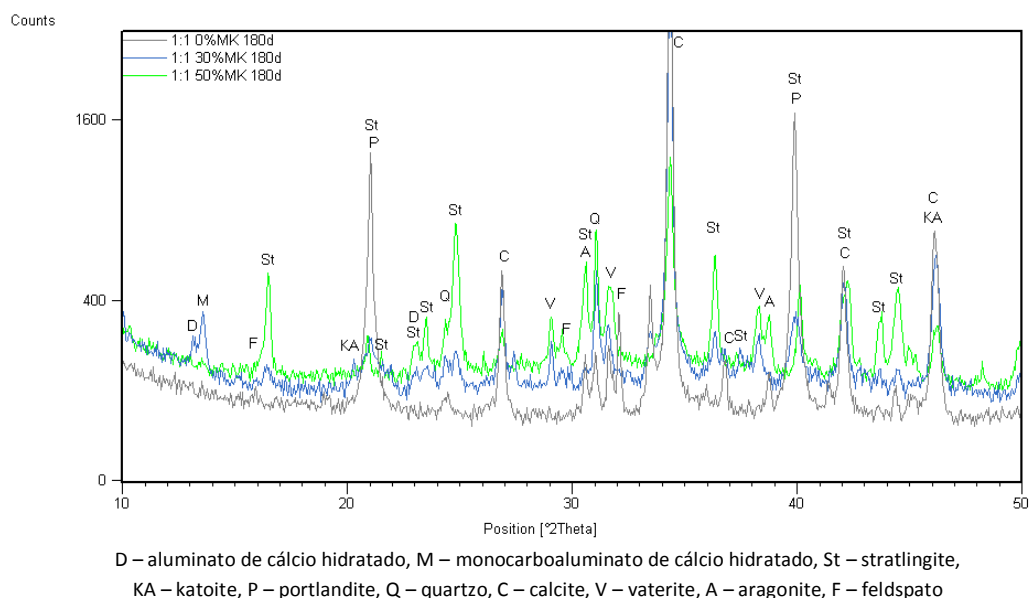


Figura 4.53 – Difractogramas das argamassas de cal aérea com traço 1:1 e 0, 30 e 50% de Mk, com 180 dias de idade

Na análise das curvas DTG (Figura 4.54) verifica-se mais facilmente a discrepância de quantidade de compostos pozolânicos e de calcite formada entre as argamassas. Apenas na argamassa só de cal aérea se registou a presença de portlandite (confirmando a análise de DRX, Figura 4.53), indiciando que a reacção de carbonatação ainda se encontra incompleta.

Quando comparadas as argamassas dos três traços volumétricos com 30% de Mk aos 180 dias (Figura 4.55), é notório que as com traço 1:1 são as que contêm compostos pozolânicos em maior abundância, nomeadamente de aluminato de cálcio hidratado (D), monocarboaluminato de cálcio hidratado (M), stratlingite (St) e katoite (KA). Comparativamente a estas, as argamassas de traço 1:2 e 1:3 com 30% de Mk apresentam o mesmo tipo de compostos formados, embora em muito menor quantidade.

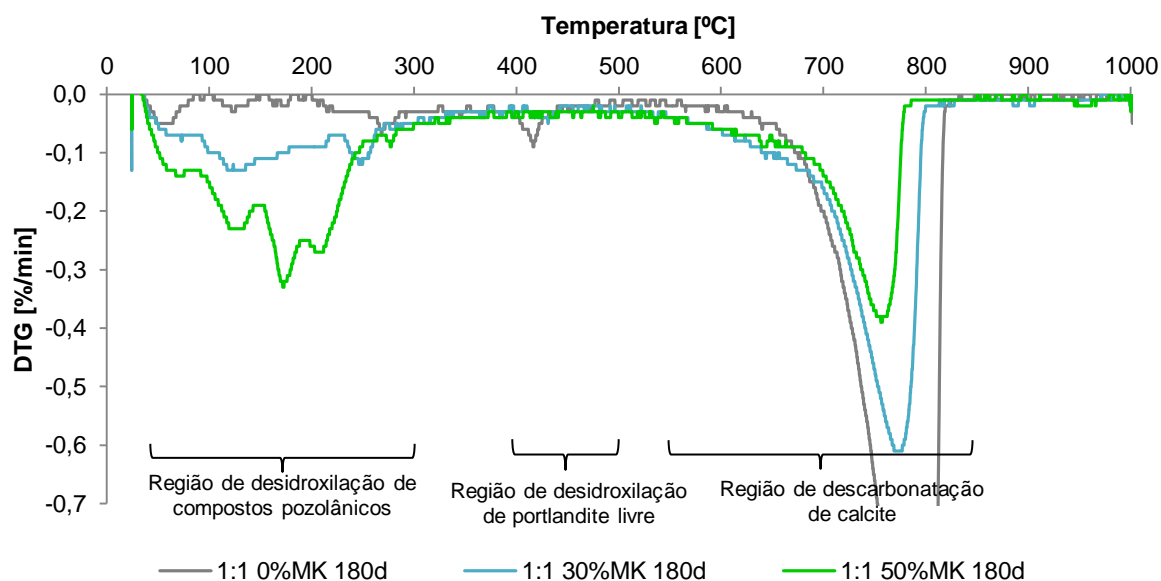


Figura 4.54 – Curvas DTG das argamassas de cal aérea com traço 1:1 e 0, 30 e 50% de Mk, com 180 dias de idade

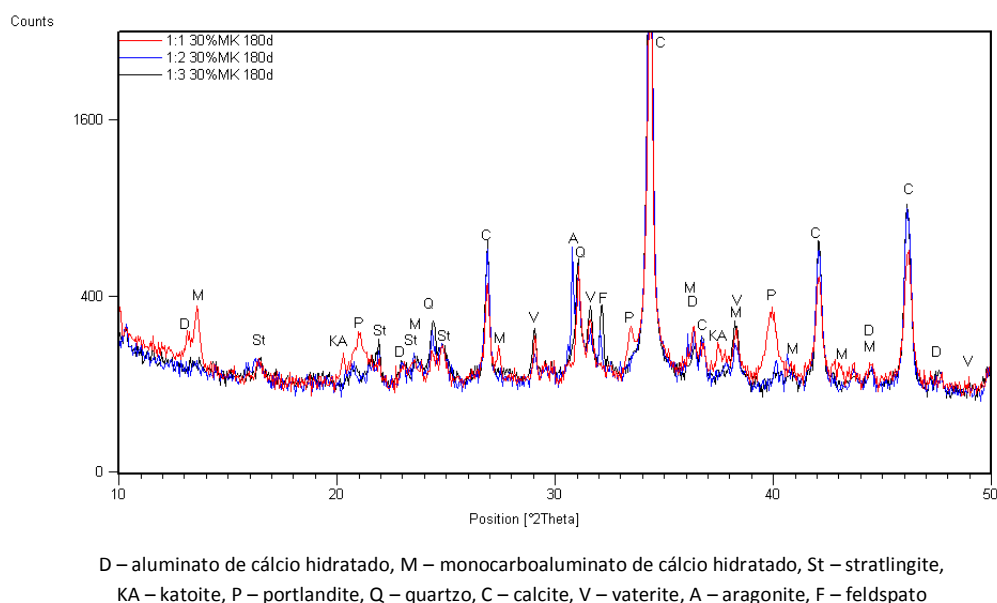


Figura 4.55 – Difractogramas das argamassas de cal aérea com traço 1:1, 1:2 e 1:3 e 30% de Mk, com 180 dias de idade

Analisando as curvas DTG das mesmas argamassas (Figura 4.56) é possível observar a presença de compostos pozolânicos, com maior intensidade na argamassa de traço mais forte em ligante. O mesmo se verifica com o teor de calcite, em que a sua intensidade é proporcional à quantidade de ligante presente nas argamassas.

Comparando as argamassas com 30% de metacaulino com as exclusivamente de cal aérea verifica-se uma menor presença de portlandite livre nas argamassas de traço 1:1, confirmando o registado na análise de DRX, e ainda uma menor intensidade de calcite em todas as argamassas

com 30% de Mk. Este facto está relacionado com a menor quantidade de cal aérea presente nas argamassas, originada pela sua substituição por massa equivalente de metacaulino.

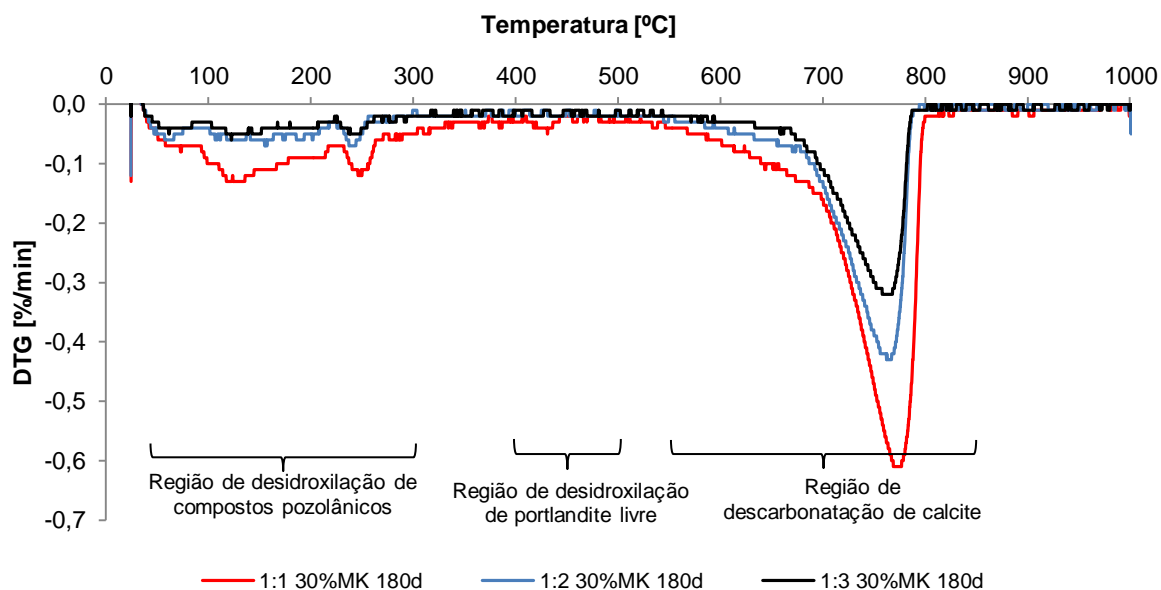


Figura 4.56 – Curvas DTG das argamassas de cal aérea com traço 1:1, 1:2 e 1:3 e 30% de Mk, com 180 dias de idade

Os aluminatos de cálcio hidratados (D e M) apesar de presentes na argamassa de traço 1:1 com 50% de Mk aos 28 e 90 dias, não apresentam vestígios significativos da sua presença aos 180 dias (Figura 4.57). Apesar da intensidade dos picos dos diferentes compostos ser semelhante nas diferentes argamassas verifica-se que, quanto mais fraco em ligante for o traço, maior é a presença de stratlingite e de vaterite (Figura 4.58).

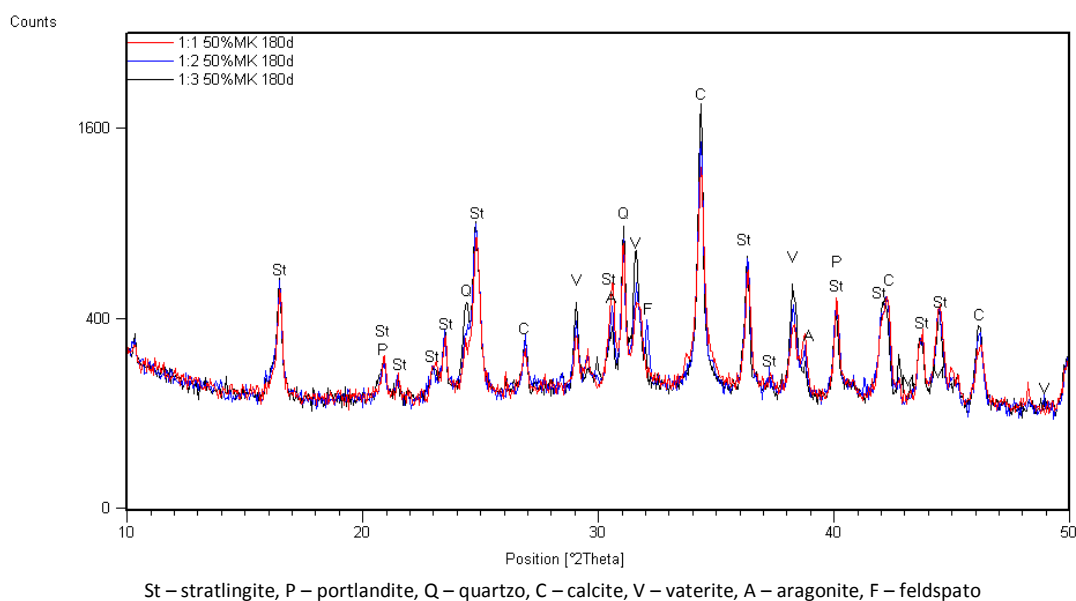


Figura 4.57 – Difractogramas das argamassas de cal aérea com traço 1:1, 1:2 e 1:3 e 50% de Mk, com 180 dias de idade

Tal como anteriormente referido, contrariamente à análise de DRX, pela análise de DTG (Figura 4.58) é facilmente diferenciável a intensidade de compostos presentes nas diferentes argamassas com 50% de Mk. Tal como as argamassas 30% da pozolana, estas argamassas apresentaram um acréscimo bastante significativo de compostos pozolânicos e uma redução da quantidade de calcite presente.

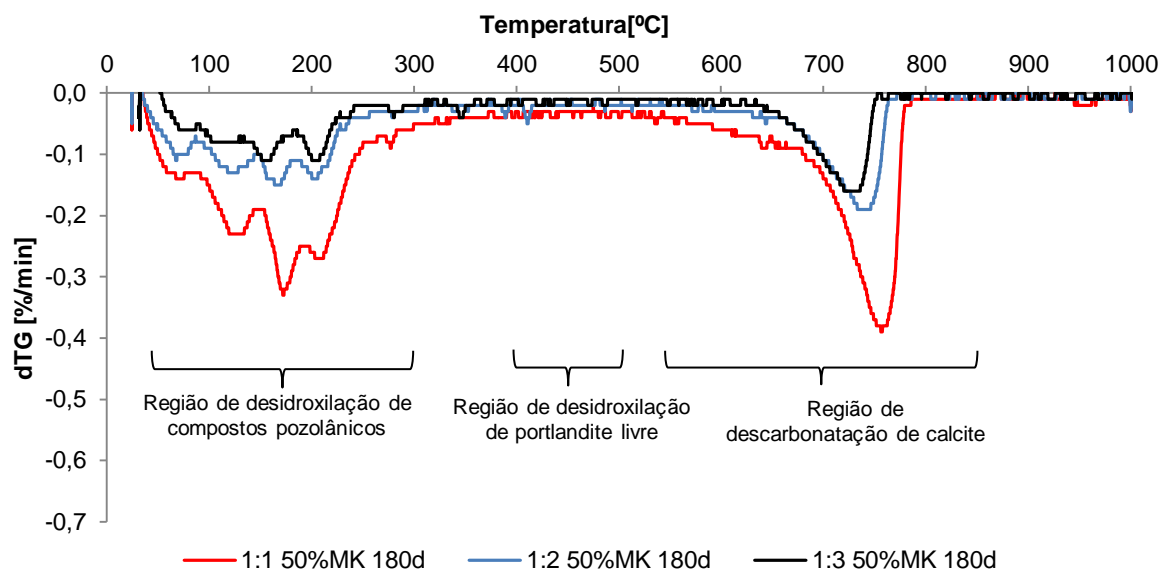


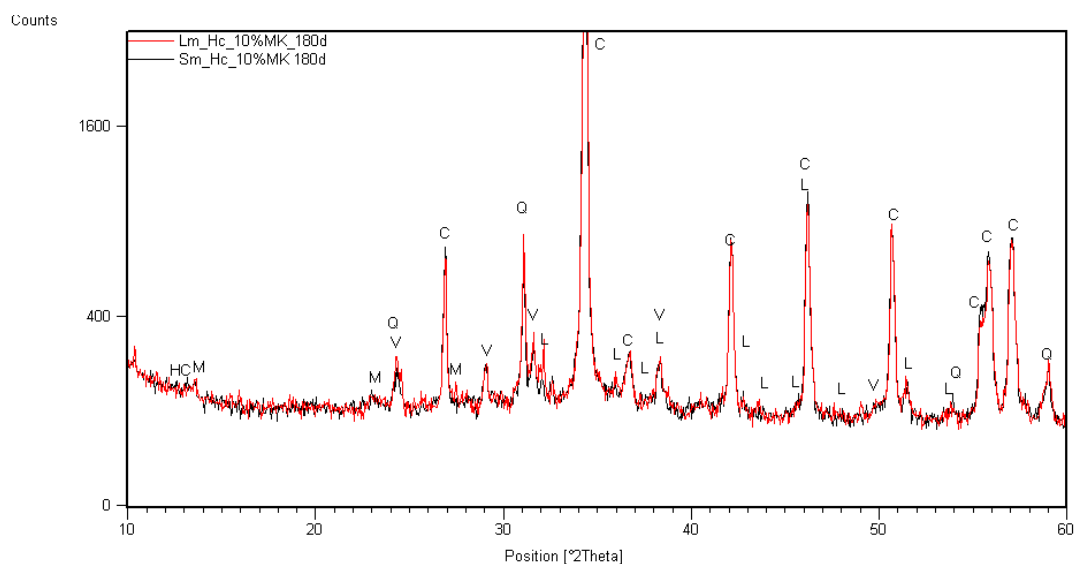
Figura 4.58 – Curvas DTG das argamassas de cal aérea com traço 1:1, 1:2 e 1:3 e 50% de Mk, com 180 dias de idade

- Análise das argamassas de cal hidráulica natural

Avaliando a influência do tempo de amassadura nas argamassas de NHL constata-se que, nas argamassas com incorporação de 10% de metacaulino, a argamassa produzida com uma amassadura longa (Lm) apresenta uma maior formação de compostos pozolânicos: monocarboaluminato de cálcio hidratado (M) e hidrocaulomite (HC). Este efeito verifica-se a todas as idades analisadas apesar da diminuição ao longo do tempo.

Na análise DRX (Figura 4.59) apenas é possível verificar que o tipo e a intensidade dos compostos existentes é tenuemente superior nas argamassas fabricadas com amassadura longa Lm comparativamente a amassadura curta Sm. Verifica-se ainda que compostos formados em idades mais jovens – etringite (E) e aluminato de cálcio hidratado (D), que foram observados a idades mais jovens [Branco, 2013] – já não são observados aos 180 dias visto serem instáveis. Entre as argamassas com diferentes tempos de amassadura sem metacaulino não se verificam diferenças significativas nos compostos formados.

Na Figura 4.60, onde estão representadas as DTG das argamassas com 0 e 10% de Mk, é possível, apesar da diferença pouco significativa, identificar uma maior quantidade de compostos pozolânicos na argamassa NHL.3_Lm_Hc_10Mk. A inexistência de portlandite livre é evidente em todas as argamassas. Relativamente à reacção de carbonatação verifica-se que esta desenvolveu-se mais nas argamassas produzidas com uma amassadura mais longa, independentemente da presença de metacaulino na sua composição.



HC – hidrocaulomite, M – monocarboaluminato de cálcio hidratado, Q – quartz, V – vaterite, C – calcite, L – larnite

Figura 4.59 – Difractogramas das argamassas NHL com 10% de Mk, avaliando a influência do tempo de amassadura aos 180 dias

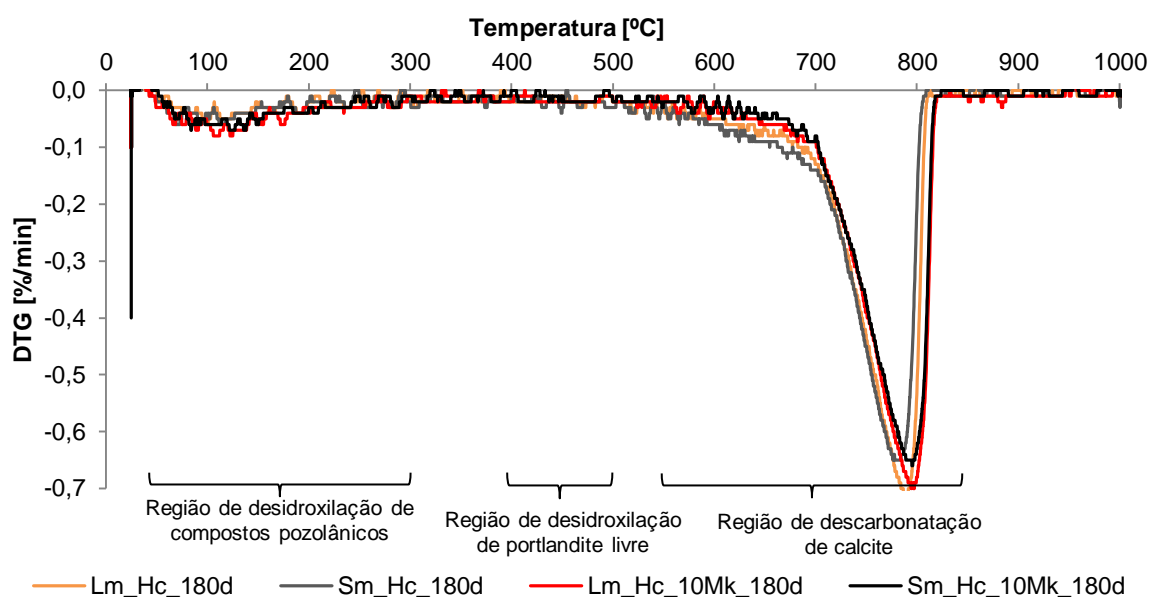


Figura 4.60 – Curvas DTG das argamassas NHL com 0 e 10% de Mk, avaliando a influência do tempo de amassadura aos 180 dias

Comparando os tipos de cura utilizados verifica-se, tanto nas argamassas só de NHL, como nas argamassas com 10% de Mk que, quando submetidas a cura húmida, estas apresentam maior quantidade de compostos resultantes da reacção de hidratação (nomeadamente E e M). A intensidade dos compostos hidráulicos é bastante baixa aos 180 dias; ainda assim é possível identificar, a esta idade, uma maior quantidade destes composto e de calcite (C) nas argamassas submetidas a cura húmida (Figura 4.61e Figura 4.62).

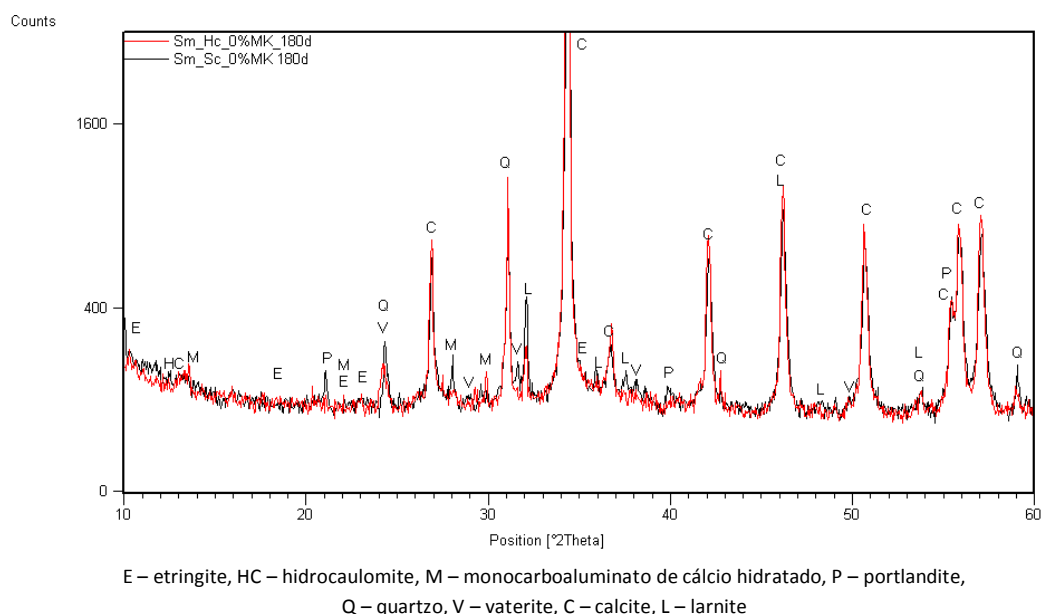


Figura 4.61 – Difractograma das argamassas NHL sem Mk, avaliando a influência do tipo de cura aos 180 dias

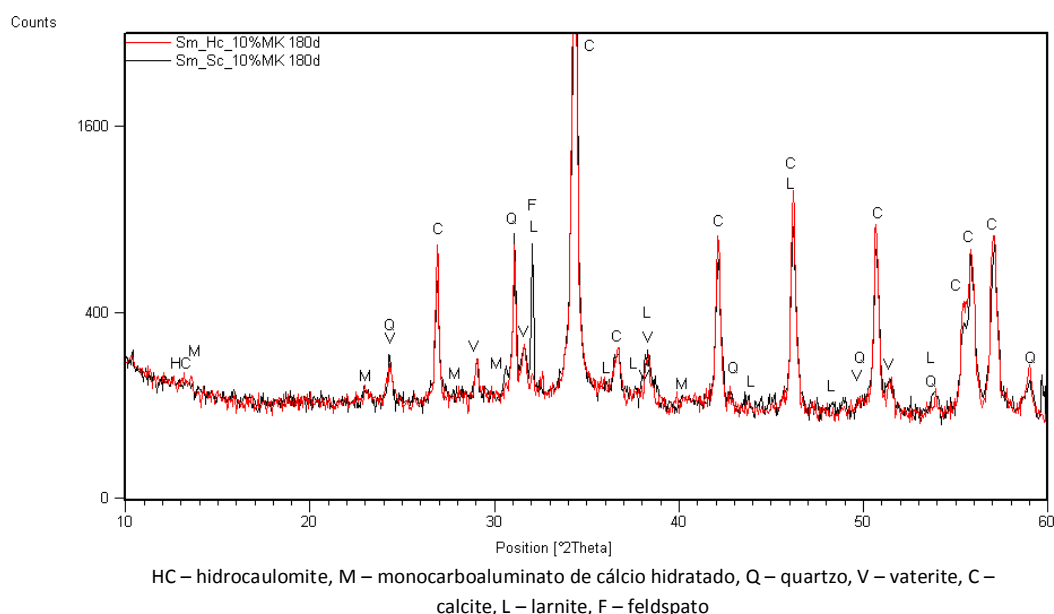


Figura 4.62 – Difractogramas das argamassas NHL com 10% de Mk, avaliando a influência do tipo de cura aos 180 dias

Confirma-se por DTG (Figura 4.63) que na cura húmida há, comparativamente à cura *standard*, maior formação de calcite. Apesar da quantidade de compostos pozolânicos ser semelhante entre as argamassas, a intensidade no pico relativo à descarbonatação de calcite é maior nas argamassas submetidas a Hc, independentemente do teor de Mk.

Analisando a influência do teor de metacaulino nas argamassas (Figura 4.64) verifica-se, aos 180 dias, a baixa existência de compostos pozolânicos (M e D) e a falta de portlandite. Ainda assim é possível observar por análise de DRX que a intensidade dos picos referentes aos compostos M e V é proporcional à quantidade de metacaulino presente nas argamassas, tal como a quantidade de compostos amorfos, verificado pelo acréscimo da linha de fundo.

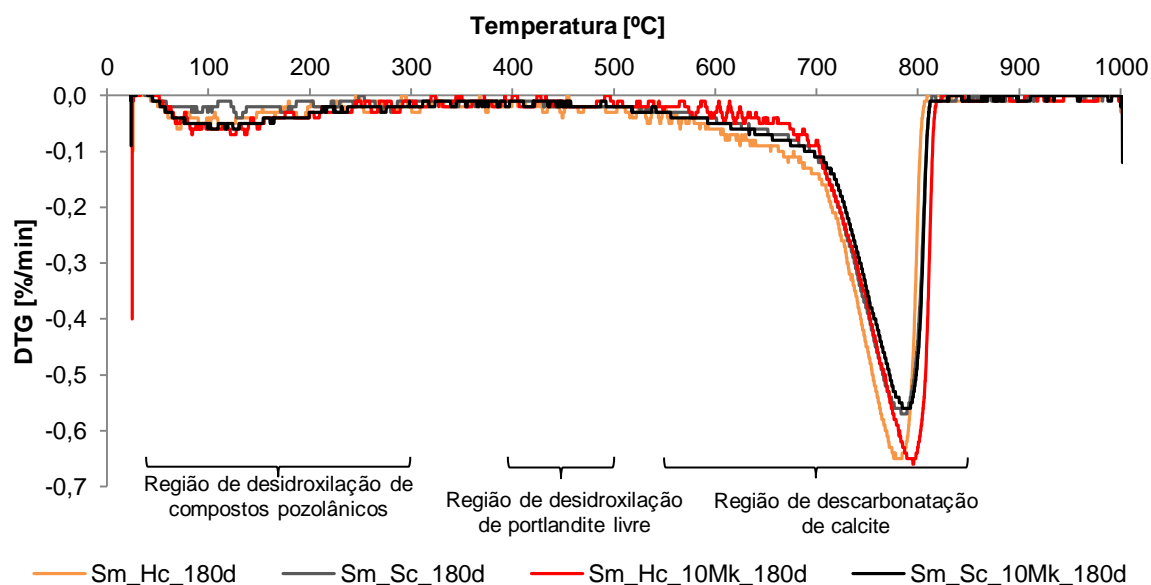


Figura 4.63 – Curvas DTG das argamassas NHL com 0 e 10% de Mk, avaliando a influência do tipo de cura aos 180 dias

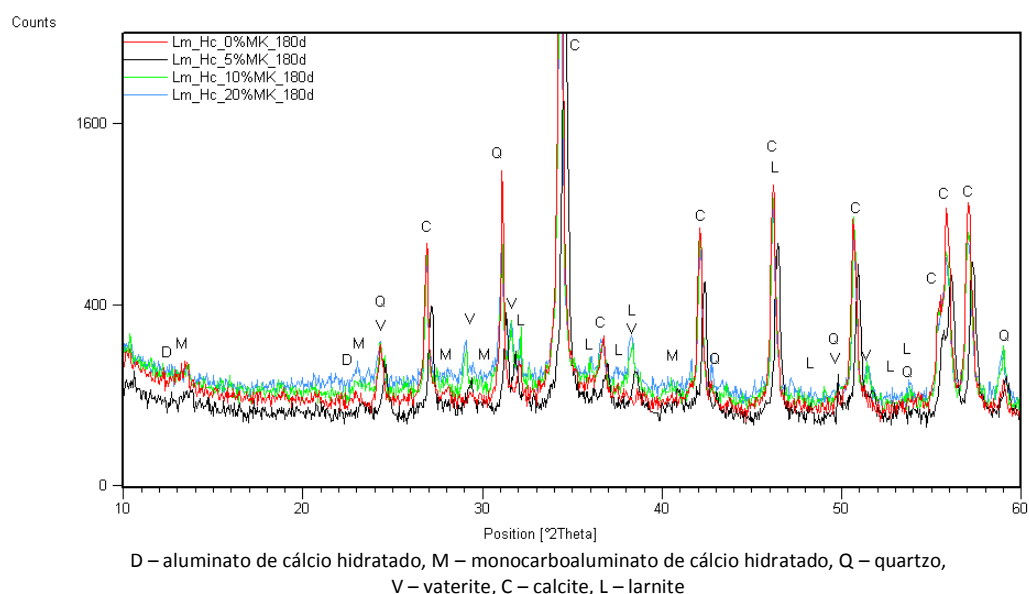


Figura 4.64 – Difractogramas das argamassas NHL, avaliando a influência do teor de Mk aos 180 dias

As argamassas de NHL formam compostos ligeiramente diferentes das de CL, nomeadamente HC, E e L. No entanto não se verificou a formação de stratlingite (St), composto que foi gerado nas argamassas de CL com metacaulino.

Na Figura 4.65 apresenta-se o DTG das argamassas NHL com diferentes teores de Mk, com 180 dias de cura húmida.

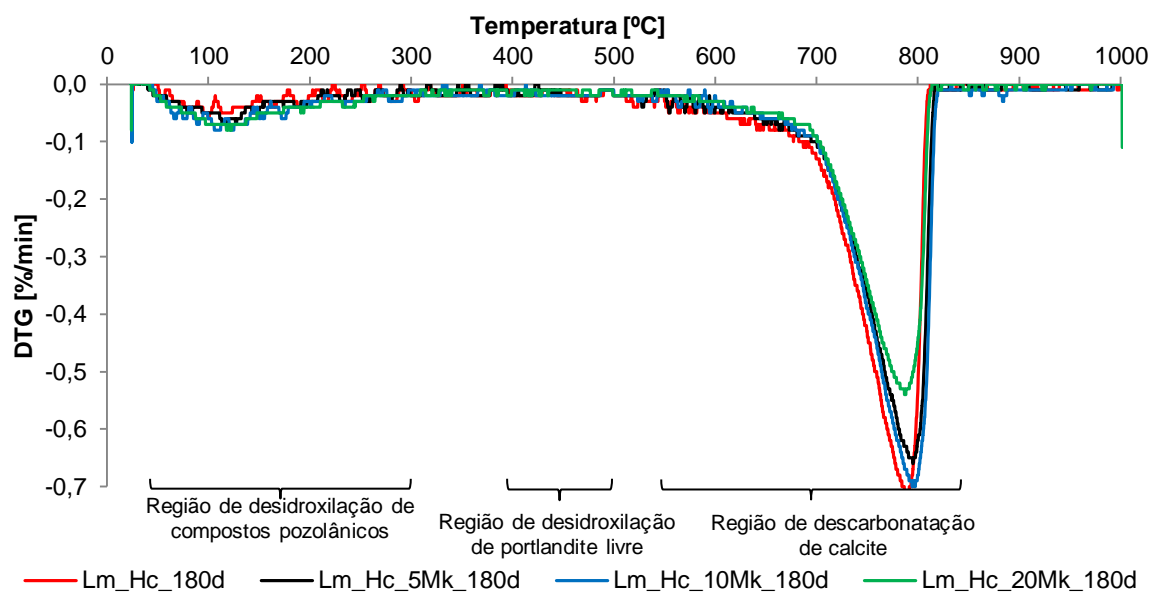


Figura 4.65 – Curvas DTG das argamassas NHL, avaliando a influência do teor de Mk aos 180 dias

Como seria espectável, a quantidade de compostos pozolânicos é proporcional ao teor de metacaulino das argamassas. No entanto, relativamente à quantidade de calcite, não se verifica o inverso. A argamassa NHL.3_Lm_Hc_10Mk, apesar de menor quantidade (em massa) de NHL que a argamassa com 5% de Mk, apresentou maior quantidade de calcite formada aos 180 dias.

A inexistência de portlandite a esta idade evidencia que as reacções de hidratação e carbonatação se encontram completas,

5. DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Após análise individual aos resultados de cada ensaio de caracterização procede-se, neste capítulo, a uma análise global dos resultados apresentados por cada argamassa, interrelacionando os resultados obtidos nos ensaios realizados.

Realiza-se também uma análise dos resultados obtidos aos 180 dias de idade das argamassas, face aos resultados obtidos, aos 28 dias e aos 90 dias de idade das mesmas argamassas, por outros autores [BRANCO, 2013; CARNEIRO, 2012]. Dessa forma é apresentada a evolução destas argamassas com a idade. Realizadas as análises mencionadas, é efectuada então uma avaliação exigencial das potenciais aplicações de cada argamassa.

5.1. Resultados obtidos em argamassas de cal aérea

No Quadro 5.1 apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios de caracterização mecânica; no Quadro 5.2 apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios de absorção capilar e de secagem; no Quadro 5.3 apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios de porosidade aberta, massa volúmica aparente, condutibilidade térmica e resistência aos sulfatos.

Quadro 5.1 – Resultados das argamassas de cal aérea: módulo de elasticidade dinâmico, resistência à tracção por flexão e à compressão

Argamassas de cal aérea						
Designação	Características mecânicas [MPa]					
	Ed		Rt		Rc	
	Méd	DP	Méd	DP	Méd	DP
CL.3	3092	182	0,24	0,02	0,37	0,02
CL.3-2	-	-	-	-	0,48	0,00
CL.3_Mk30	2275	49	0,06	0,01	0,30	0,03
CL.3_Mk30-2	1360	87	0,17	0,03	0,53	0,04
CL.3_Mk50	1362	37	0,20	0,01	0,56	0,02
CL.3_Mk50-2	2714	75	0,48	0,05	1,52	0,12
CL.2	3290	219	0,30	0,04	0,48	0,05
CL.2_Mk30	3605	626	0,48	0,01	1,41	0,13
CL.2_Mk50	4900	243	1,24	0,08	3,13	0,10
CL.1	3488	253	0,49	0,01	1,08	0,06
CL.1-2	3650	110	0,58	0,08	0,99	0,05
CL.1_Mk30	8245	168	1,69	0,05	6,32	0,37
CL.1_Mk30-2	6631	104	1,58	0,09	6,09	0,18
CL.1_Mk50	4662	592	1,07	0,05	6,27	0,07

Quadro 5.2 – Resultados das argamassas de cal aérea: coeficiente de capilaridade, valor assintótico, índice taxa e coeficiente de secagem

Argamassas de cal aérea										
Designação	Absorção capilar				Secagem					
	CC [kg/(m ² .min ^{1/2})]		VA [kg/m ²]		IS [-]		TS [kg/(m ² .h)]		CS [kg/(m ² .h ^{1/2})]	
	Méd	DP	Méd	DP	Méd	DP	Méd	DP	Méd	DP
CL.3	3,54	0,11	18,0	0,9	0,16	0,01	0,081	0,007	1,35	0,12
CL.3-2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CL.3_Mk30	4,67	0,25	23,6	0,8	0,20	0,02	0,089	0,004	1,74	0,03
CL.3_Mk30-2	2,59	0,21	24,7	0,9	0,19	0,02	0,102	0,004	2,17	0,04
CL.3_Mk50	3,37	0,13	25,7	1,6	0,22	0,00	0,100	0,007	1,90	0,22
CL.3_Mk50-2	1,88	0,09	24,4	0,9	0,19	0,01	0,128	0,024	2,06	0,06
CL.2	3,57	0,80	18,5	2,4	0,14	0,03	0,106	0,006	1,45	0,14
CL.2_Mk30	3,00	0,07	25,7	2,2	0,20	0,01	0,114	0,008	2,02	0,21
CL.2_Mk50	1,83	0,07	26,8	3,7	0,25	0,02	0,113	0,005	1,87	0,13
CL.1	3,99	0,18	23,3	2,8	0,20	0,03	0,110	0,007	1,73	0,13
CL.1-2	3,10	0,21	21,7	0,6	0,23	0,01	0,090	0,003	1,57	0,02
CL.1_Mk30	1,59	0,16	26,1	1,9	0,31	0,02	0,124	0,003	1,55	0,07
CL.1_Mk30-2	1,57	0,06	27,4	1,2	0,33	0,02	0,126	0,019	1,71	0,10
CL.1_Mk50	1,72	0,11	24,8	3,0	0,29	0,02	0,125	0,015	1,54	0,11

Quadro 5.3 – Resultados das argamassas de cal aérea: porosidade aberta, massa volúm. aparente, condutibilidade térmica e variação de massa aos 20 ciclos de ataque por sulfatos

Argamassas de cal aérea								
Designação	Porosidade aberta [%]		Massa volúm. ap. [kg/m ³]		Cond. térm. λ [W/m.K]		Res. Sulfatos Δm 20c [%]	
	Méd	DP	Méd	DP	Méd	DP	Méd	DP
CL.3	24,5	0,4	1680	15	0,65	0,02	-3,1	2,3
CL.3-2	24,2	1,1	1687	33	-	-	-	-
CL.3_Mk30	32,2	1,5	1612	25	-	-	-73,9	15,0
CL.3_Mk30-2	31,9	0,4	1667	15	0,46	0,01	-45,1	6,8
CL.3_Mk50	32,5	0,7	1620	13	-	-	-38,5	5,4
CL.3_Mk50-2	31,2	0,7	1630	13	0,49	0,04	-6,3	5,2
CL.2	25,4	1,6	1705	9	0,65	0,01	0,2	0,5
CL.2_Mk30	32,6	1,6	1621	39	0,56	0,03	1,1	0,1
CL.2_Mk50	31,8	1,3	1596	31	0,66	0,03	3,4	0,1
CL.1	30,1	0,5	1701	10	-	-	2,1	1,8
CL.1-2	30,7	1,3	1684	28	0,74	0,03	-1,8	8,6
CL.1_Mk30	32,3	0,2	1606	4	-	-	-38,3	16,9
CL.1_Mk30-2	34,3	0,9	1585	17	0,80	0,05	-100,0	0,0
CL.1_Mk50	34,1	0,6	1593	7	0,60	0,02	5,1	0,8

5.1.1. Análise global dos resultados das argamassas aos 180 dias

Na secção 4.2 verificou-se a relação existente entre as resistências à compressão e à tracção. Verifica-se agora, como era esperado, uma relação proporcional entre os resultados obtidos de resistência à tracção e módulo de elasticidade dinâmico. Tal como ilustrado na Figura 5.1, verifica-se que os resultados mais elevados de R_t correspondem igualmente a valores elevados de E_d .

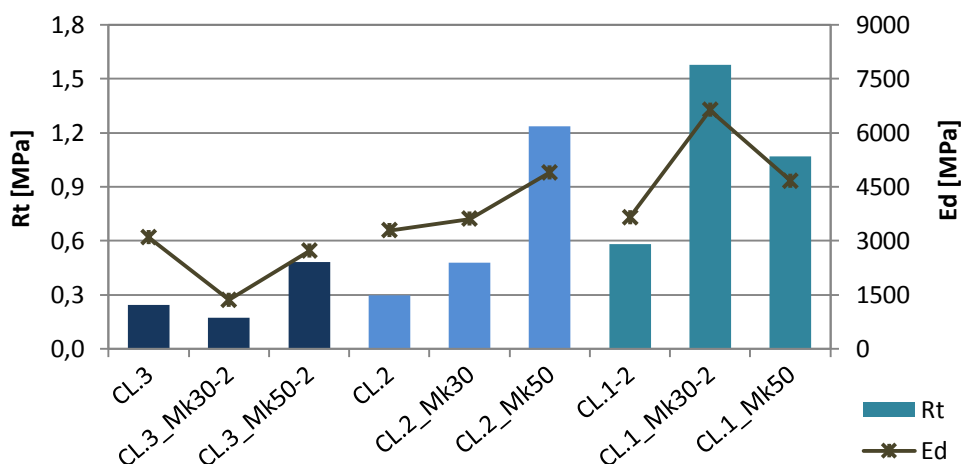


Figura 5.1 – Relação entre resistência à tracção e módulo de elasticidade dinâmico das argamassas CL

Considerando que a deformabilidade de uma argamassa depende do quociente entre as resistências mecânicas à tracção e à compressão [FARIA, 2004] verifica-se, por análise da Figura 5.2, que a presença de metacaulino na constituição das argamassas reduz significativamente esta característica, assim como o aumento do traço (em ligante) onde a pozolana não está presente. Não se verifica no entanto qualquer relação entre a deformabilidade e o módulo de elasticidade dinâmico.

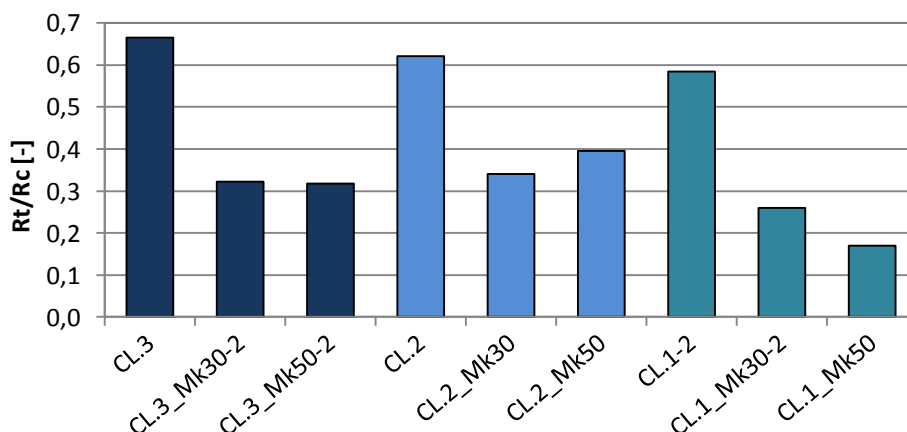


Figura 5.2 – Quociente entre resistência à tracção e à compressão (deformabilidade) das argamassas de CL

Por comparação da resistência à tracção com a resistência ao ataque por sulfatos (Figura 5.3) verificam-se comportamentos distintos de acordo com o traço volumétrico: as argamassas de traço 1:3 que apresentam maior degradação face ao ataque de sulfatos são as que registaram

menores valores de R_t , independentemente do teor de metacaulino presente; as argamassas de traço 1:1 apresentam uma relação directa, sem qualquer proporcionalidade, entre a R_t e a degradação por sulfatos. Este facto pode justificar assim os diferentes comportamentos dos dois tipos de argamassas no ensaio de resistência aos sulfatos, em que a mais fraca em ligante apresentou uma degradação continua e as de traço 1:1 com 30% de Mk apresentaram uma rotura brusca. As argamassas de traço 1:2, por terem apresentado todas um bom comportamento no ensaio de resistência ao ataque de sulfatos, impossibilitam qualquer conclusão.

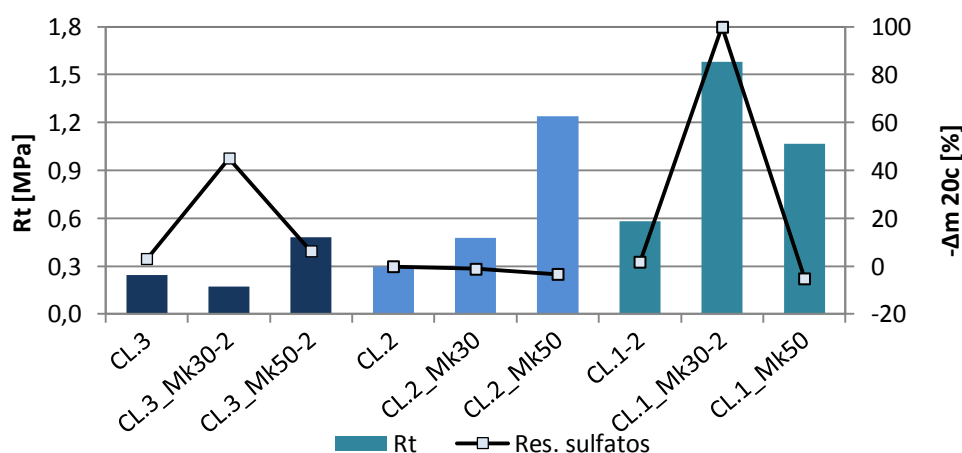


Figura 5.3 – Relação entre a resistência à tracção e a variação de massa aos 20 ciclos de ataque por sulfatos

É um facto que a resistência mecânica das argamassas depende da sua compactidade que, por sua vez, depende da quantidade e da dimensão dos poros [RATO, 2006]. Na secção 4.5 verificou-se que a substituição de metacaulino por cal aumenta o valor de P_{ab} , enquanto na secção 4.2 observou-se que a resistência aumenta com o traço e o teor de Mk. Este facto contraria assim a relação entre a porosidade e a resistência mecânica: quanto maior a porosidade menor a compactidade, o que implica uma menor resistência mecânica. Assim sendo foi realizada uma comparação entre os resultados de resistência à compressão e os obtidos no ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio.

A porosidade aberta, para além de determinada pelo método de pesagens hidrostáticas ($P_{ab,ph}$), foi também determinada no ensaio de análise de porosimetria por intrusão de mercúrio ($P_{ab,im}$). Considera-se o ensaio de intrusão de mercúrio mais rigoroso, mas é também mais dispendioso e complexo que o método de pesagens hidrostáticas; por esse motivo apenas houve possibilidade de ensaiar uma amostra de cada argamassa. Comparando os resultados obtidos em ambos os ensaios (Figura 5.4) verifica-se que os obtidos por intrusão de mercúrio são, em geral, apenas ligeiramente superiores aos obtidos pelo método hidrostático (à excepção das argamassas de traço 1:3 e da CL.2). Comprova-se assim que, de um modo geral e especialmente nos traços 1:1 e 1:2, os resultados são comparáveis entre os dois métodos.

A relevância da quantidade de poros de diâmetro $0,17\mu m$ existente em todas as argamassas é evidente na Figura 4.44 (secção 4.8). As argamassas que apresentaram maior quantidade de poros com este reduzido diâmetro são consequentemente as que apresentaram menores quantidades de poros de maiores dimensões, podendo-se deduzir assim que são

efectivamente as argamassas de poros mais finos. Por análise da Figura 5.5, é possível observar a relação entre a quantidade de poros finos e a sua resistência à compressão (e analogamente R_t e E_d).

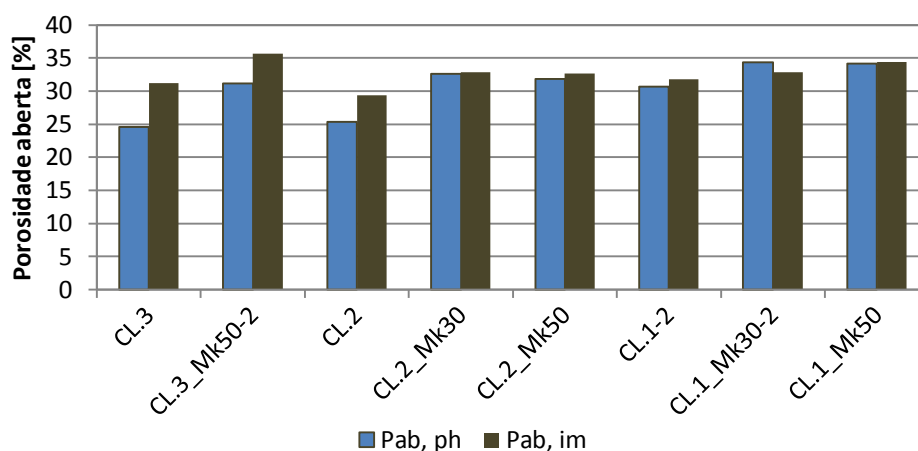


Figura 5.4 – Comparação entre os resultados de porosidade aberta obtidos pelo método de pesagens hidrostáticas (Pab,ph) e por intrusão de mercúrio (Pab,im)

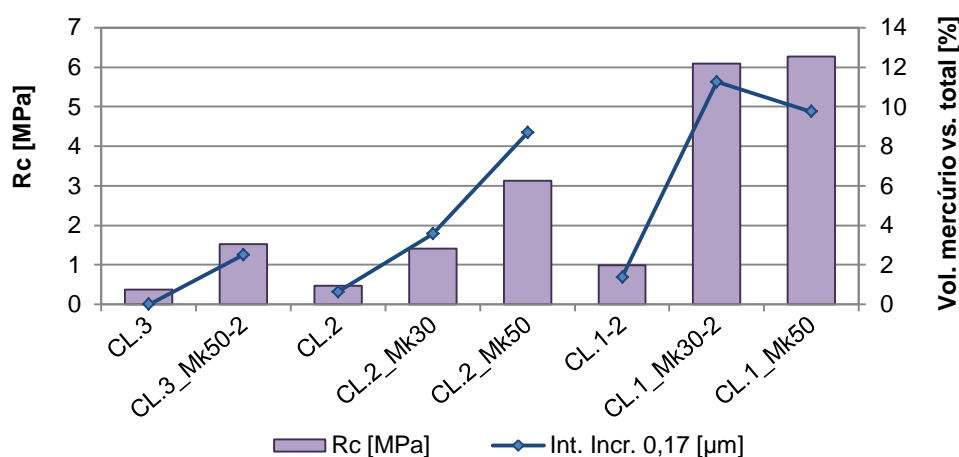


Figura 5.5 – Relação entre resistência à compressão e a quantidade de poros finos

A dimensão, quantidade e conectividade dos poros representam também um papel significativo no processo de carbonatação. Quanto maiores estes factores, mais facilmente se dá o contacto entre hidróxido de cálcio e o dióxido de carbono [RATO, 2006].

Este facto é possível ser confirmado no presente estudo por comparação do teor de carbonatos, obtida na análise com a quantidade de poros registados de maiores dimensões (109 μ m) no ensaio de porosimetria de mercúrio (Figura 5.6).

Observa-se, como espectável, que a quantidade de carbonatos formados é tanto maior quanto mais forte em ligante é o traço e quanto menor a quantidade de metacaulino presente (maior quantidade de cal para reagir). Avaliando separadamente cada traço verifica-se que os maiores resultados obtidos correspondem às argamassas só de cal aérea, sendo maiores quanto mais forte em ligante for o traço, isto é, as argamassas CL.3, CL.2 e CL.1-2 apresentam maior teor de calcite

formada e maior quantidade de poros de 109 μm que as do mesmo traço mas com metacaulino na sua constituição. Estas características diminuem com o teor de metacaulino utilizado em substituição parcial do ligante. Este facto deve-se a, nesses casos, haver uma competição, entre o dióxido de carbono e a sílica e alumina reactivas, pela reacção com o hidróxido de cálcio, havendo um menor teor de carbonatação, tal como fica demonstrado na Figura 5.6.

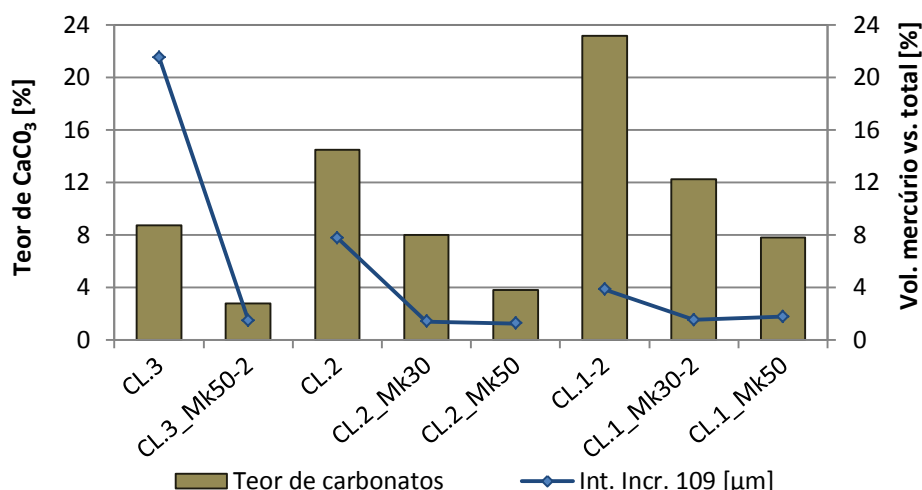


Figura 5.6 – Relação entre o teor de carbonatos e a quantidade de poros de grandes dimensões

Para além destes factores, a estrutura porosa é ainda condicionante no comportamento de uma argamassa à acção da capilaridade através da quantidade, dimensão e conectividade dos poros. Quando estes são de menor diâmetro a pressão capilar é maior, causando uma ascensão superior de água [RATO, 2006].

De facto, analisando o valor assintótico de água absorvida nas argamassas de cal aérea (determinado considerando que o volume médio dos meios provetes utilizados no ensaio de capilaridade é comparável) e a quantidade de poros finos (de 0,17 μm), verifica-se a conformidade entre estas duas características (Figura 5.7). Apesar desta relação não ser proporcional, é possível verificar que, em cada traço volumétrico, quanto maior a quantidade de poros finos, maior o VA.

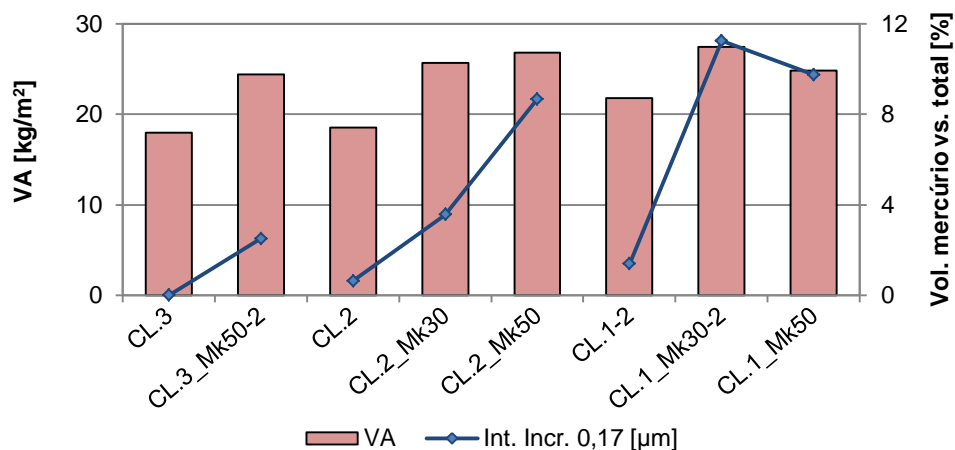


Figura 5.7 – Relação entre a absorção capilar (VA) e a quantidade de poros finos

Rato (2006) constatou ainda no seu estudo que “a velocidade de absorção inicial aumenta com o aumento do diâmetro dos poros, pelo que é expectável que argamassas com poros grandes apresentem um maior coeficiente de capilaridade do que argamassas com poros pequenos”. Esta afirmação é comprovada no presente estudo em que, através da Figura 5.8, se verifica um maior coeficiente de capilaridade nas argamassas que apresentam uma maior quantidade de poros de maiores dimensões.

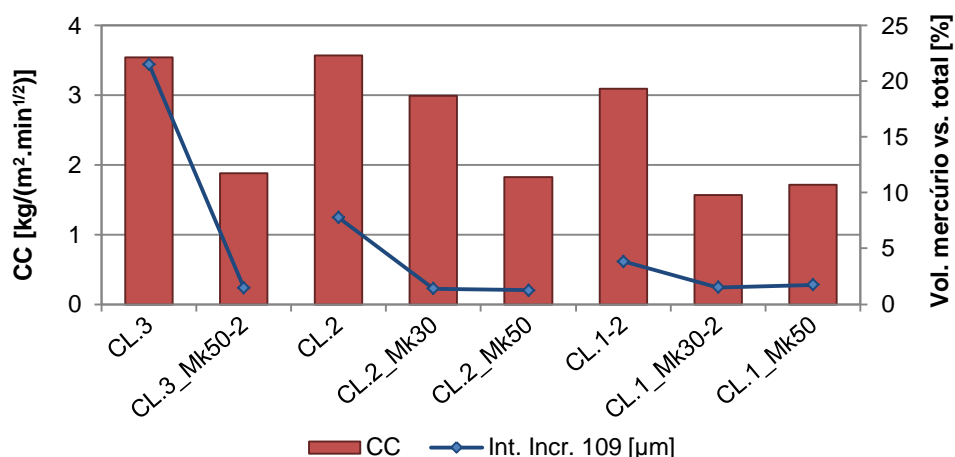


Figura 5.8 – Relação entre a velocidade de absorção inicial (CC) e a quantidade de poros de grandes dimensões

Como seria expectável, foi também verificada a relação existente entre a absorção capilar e a secagem. Como em ambos os ensaios foi garantido o fluxo unidireccional de água pela microestrutura porosa das argamassas, na Figura 5.9 é possível observar que as argamassas que absorvem maior quantidade de água por capilaridade (VA) são as que apresentam também maior dificuldade na sua secagem (maior IS). No entanto não foi identificada qualquer relação entre as velocidades de absorção e secagem de água (CC e TS).

Por análise da mesma figura é possível assim confirmar a contribuição prejudicial do metacaulino e de traços muito fortes em ligante (caso do traço 1:1 de cal aérea e areia) no comportamento face à água das argamassas de CL.

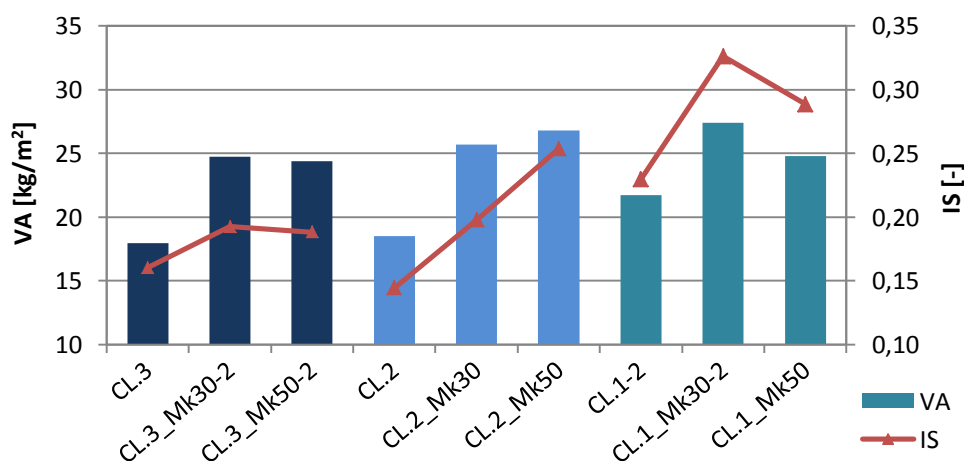


Figura 5.9 – Relação entre a absorção capilar (VA) e o Índice de Secagem das argamassas CL

5.1.2. Evolução com a idade

Comparando alguns dos parâmetros avaliados aos 180 dias de idade com os resultados obtidos em estudos anteriormente realizados por Branco (a publicar em 2013), às mesmas argamassas às idades de 28 e 90 dias, é possível avaliar a evolução com a idade das argamassas de cal aérea. A análise química e mineralógica dos compostos presentes nas argamassas em cada idade possibilita a justificação da evolução das suas características mecânicas.

- Evolução das características mecânicas

Na Figura 5.10, Figura 5.11 e Figura 5.12 apresentam-se as evoluções com a idade do módulo de elasticidade dinâmico (E_d) e das resistências à tracção (R_t) e compressão (R_c) respectivamente.

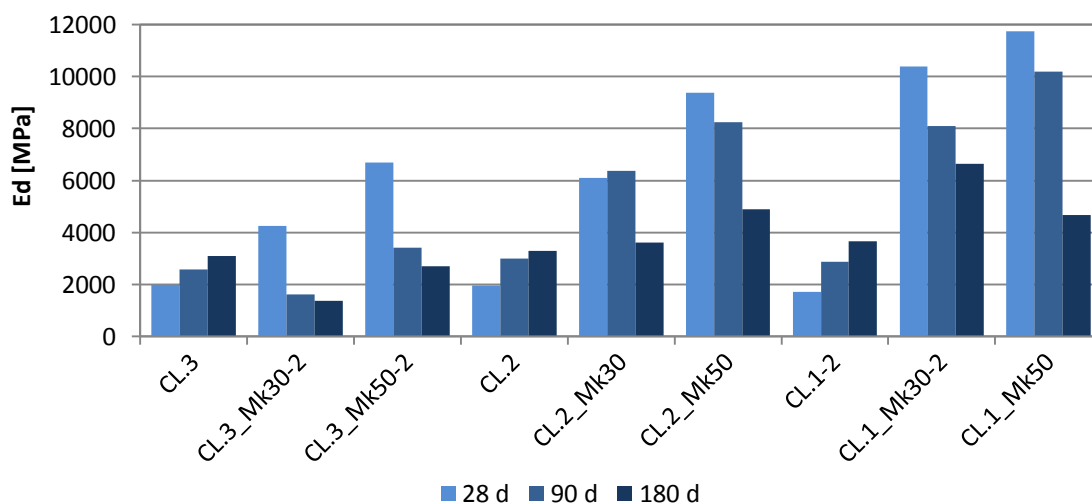


Figura 5.10 – Evolução com a idade do módulo de elasticidade dinâmico das argamassas de CL

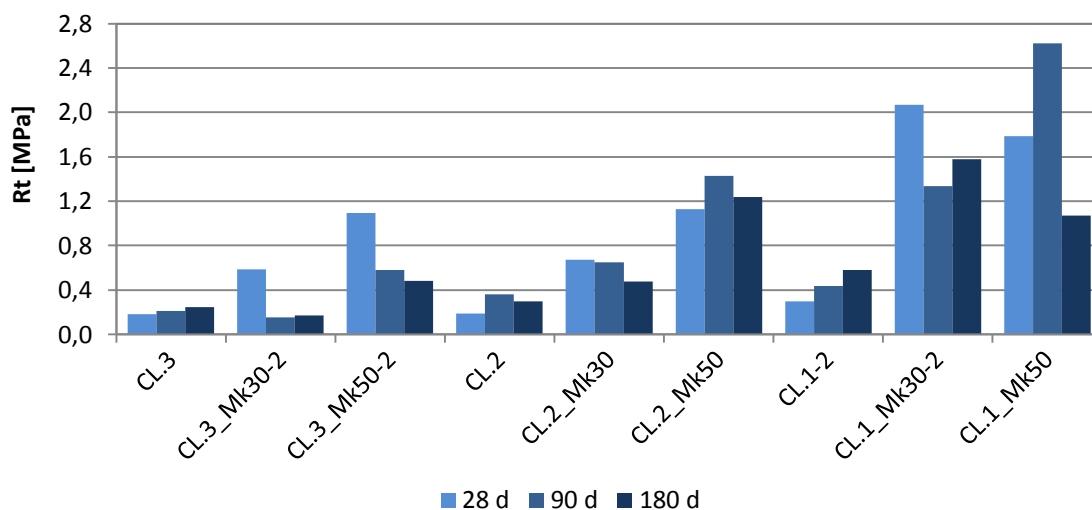


Figura 5.11 – Evolução com a idade da resistência à tracção das argamassas de CL

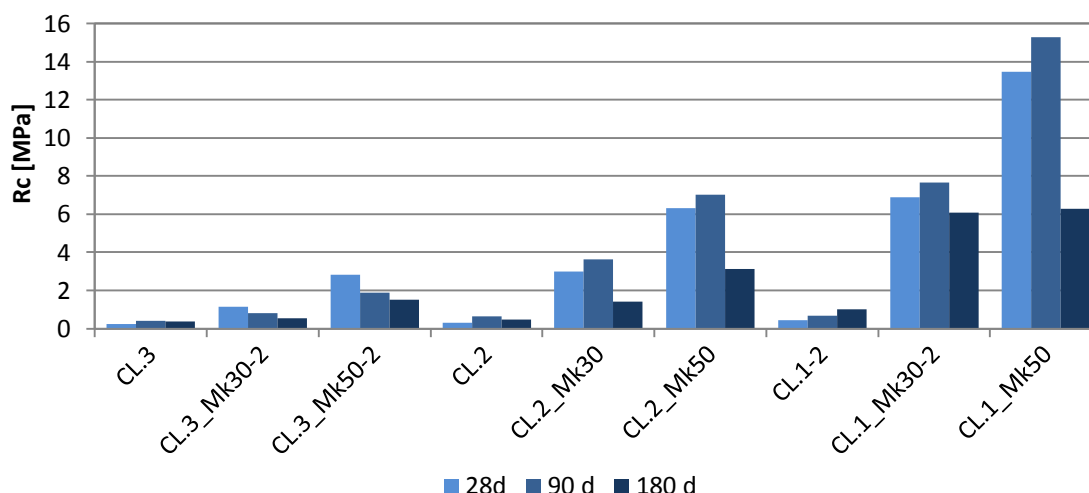


Figura 5.12 – Evolução com a idade da resistência à compressão das argamassas de CL

É importante referir que os ensaios de resistência à tracção por flexão e à compressão aos 90 dias de idade foram realizados no LNEC, ao contrário dos ensaios aos 28 e 180 dias que foram realizados no DEC/FCT UNL. Este facto põe em causa a comparabilidade entre estes resultados, visto que a realização do mesmo ensaio por duas entidades, equipamentos e metodologias diferentes pode apresentar resultados significativamente diferentes [HENRIQUES *et al.*, 2008].

Verifica-se que as argamassas só de cal aérea apresentam um crescimento gradual com a idade das três características mecânicas. Por sua vez as argamassas de CL com metacaulino na sua constituição apresentam todas uma diminuição destas características; quanto mais forte o traço e a percentagem de Mk, mais acentuada é a redução.

- Evolução da composição química e mineralógica

A evolução das argamassas estudadas ao longo da sua idade foi também avaliada na análise mineralógica por difracção de raios X e de DTG.

Na Figura 5.13 é apresentada a evolução mineralógica com o tempo da argamassa só de cal aérea com traço 1:1. Verifica-se uma diminuição do pico da portlandite livre (P) ao longo do processo de cura, embora seja ainda elevado aos 180 dias de idade, o que indicia que a carbonatação irá continuar a ocorrer durante mais algum tempo. A aragonite (A) e a calcite (C), são formações cristalinas de carbonato de cálcio que se encontram presentes nas argamassas a partir de, pelo menos, os 90 dias de idade. A argamassa de cal com traço 1:2 também apresentou, embora em menos quantidade, vestígios destes compostos que conferem consistência microestrutural às argamassas.

O mesmo é verificado pela análise DTG das mesmas argamassas (Figura 5.14). A portlandite livre (400 a 500 °C), apesar de reduzir a sua intensidade com a idade, ainda se encontra presente aos 180 dias de cura. Na argamassa de traço 1:2 só de cal aérea os registos de presença de portlandite aos 180 dias, pela mesma análise, foram muito baixos, e na argamassa com traço 1:3 praticamente inexistentes. Estes dados são coerentes com a diminuição do traço.

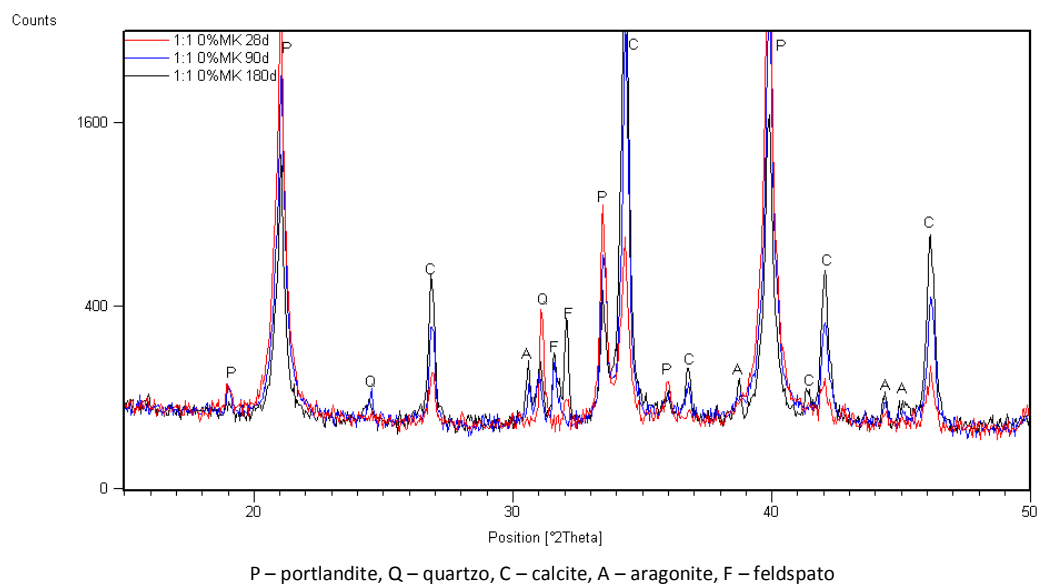


Figura 5.13 – Difractogramas das argamassas de cal aérea com traço 1:1 e 0% de Mk, aos 28, 90 e 180 dias de idade

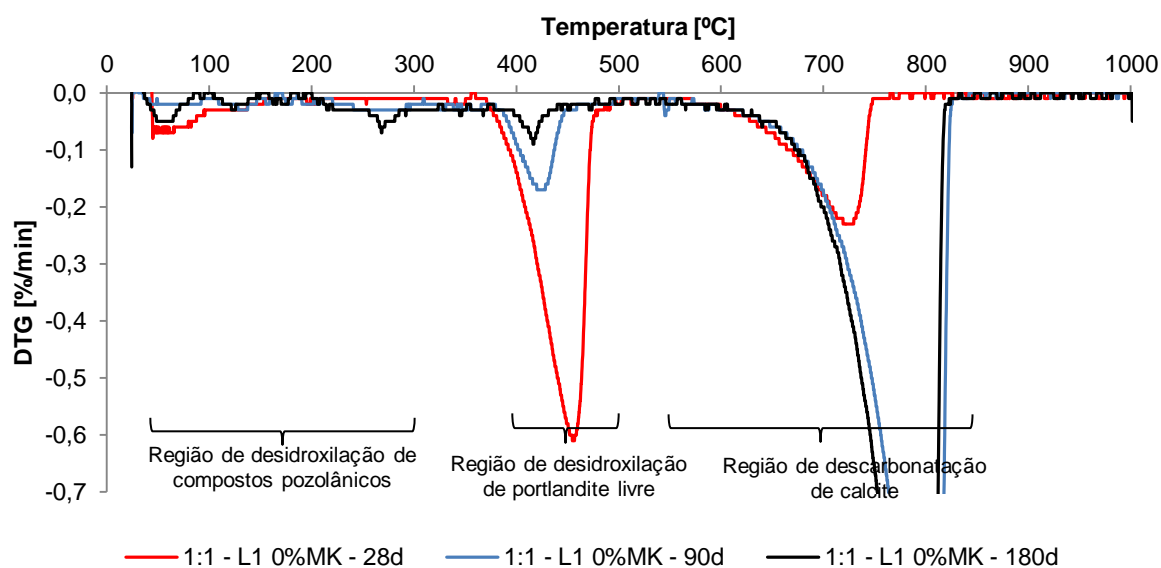


Figura 5.14 – Curvas DTG das argamassas de cal aérea com traço 1:1 e 0% de Mk, aos 28, 90 e 180 dias de idade

Analisando as argamassas com substituição parcial de 30% de massa de cal aérea por metacaulino, realizadas ao traço volumétrico de 1:1 (Figura 5.15) verifica-se a formação de compostos da reacção pozolânica entre a cal aérea e o metacaulino, nomeadamente aluminato de cálcio hidratado (D), monocarboaluminato de cálcio hidratado (M), stratlingite (St) e katoite (KA). Os compostos D, M e KA diminuem de intensidade ao longo do tempo, revelando-se instáveis. Nestas argamassas detecta-se ainda a presença de vaterite (V), um carbonato de cálcio resultante de processos de dissolução/precipitação de carbonatos.

A reacção de carbonatação evoluiu ao longo do tempo, sobretudo dos 90 para os 180 dias, facto que é confirmado pela intensificação dos picos da calcite nessas idades. Esta evolução da

reação de carbonatação é facilmente confirmada pela análise de DTG das mesmas argamassas (Figura 5.16), onde se verifica que a presença de portlandite é semelhante aos 28 e 90 dias e um ligeiro acréscimo do teor de calcite presente. Aos 180 dias é notório que a portlandite livre é bastante mais reduzida e que a calcite aumentou significativamente.

É ainda possível confirmar a redução de intensidade dos compostos pozolânicos formados em idades jovens, cuja presença aos 180 dias é bastante menor, confirmando a instabilidade dos mesmos. Sabendo que estes compostos são associados à resistência mecânica das argamassas é possível justificar, pela diminuição da sua intensidade com a idade, a redução das características mecânicas ao longo do tempo.

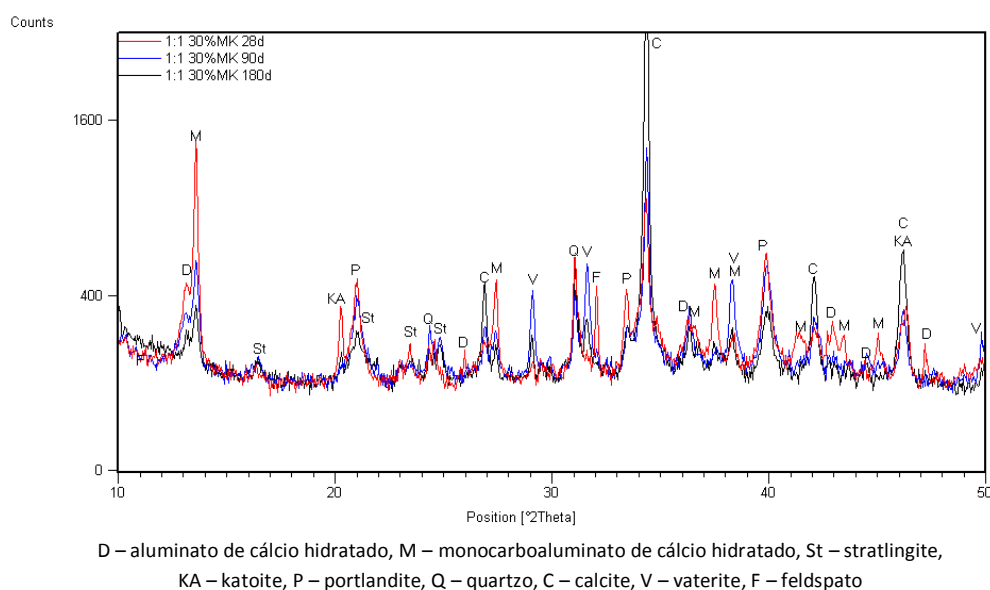


Figura 5.15 – Difractogramas das argamassas de cal aérea com traço 1:1 e 30% de Mk, aos 28, 90 e 180 dias de idade

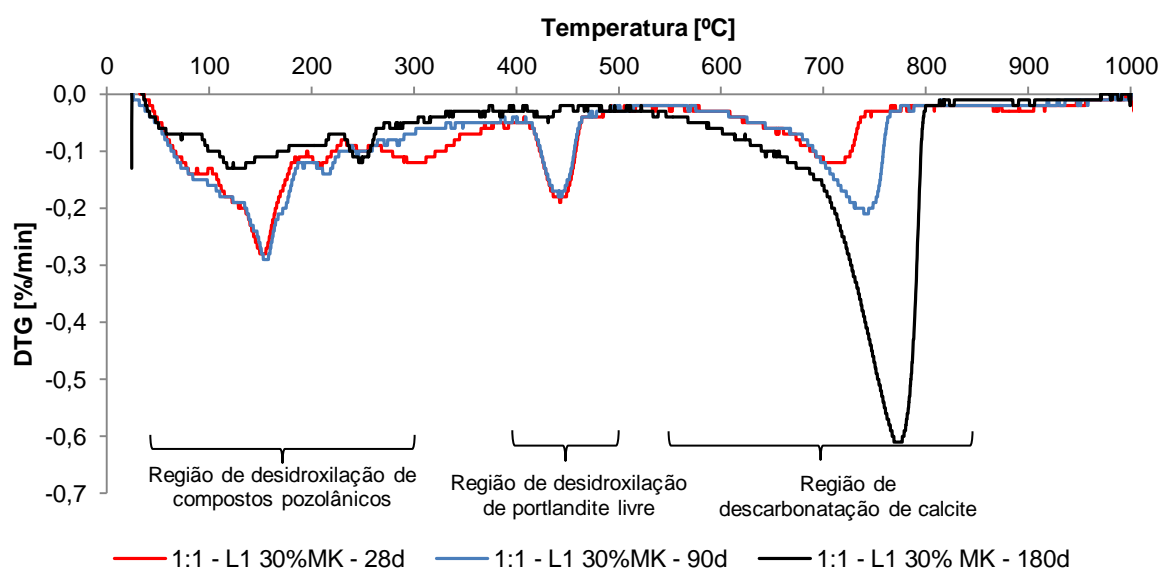


Figura 5.16 – Curvas DTG das argamassas de cal aérea com traço 1:1 e 30% de Mk, aos 28, 90 e 180 dias de idade

A argamassa CL.2_Mk50 apresenta uma maior intensidade de compostos amorfos aos 180 dias quando comparada com idades mais jovens. Este facto é verificado na Figura 5.17 pelo acréscimo da linha de fundo desse difractograma. Na mesma figura é ainda possível verificar o aumento de intensidade de St e C ao longo do tempo, o que leva a presumir um aumento progressivo das resistências mecânicas com a idade, o que não corresponde ao verificado na Figura 5.11 e na Figura 5.12. Este facto indicia assim que outros factores poderão estar na origem da redução das propriedades mecânicas com a idade de cura nas argamassas com introdução de Mk, nomeadamente microfissuração, para o que contribui o aumento da razão A/CL.

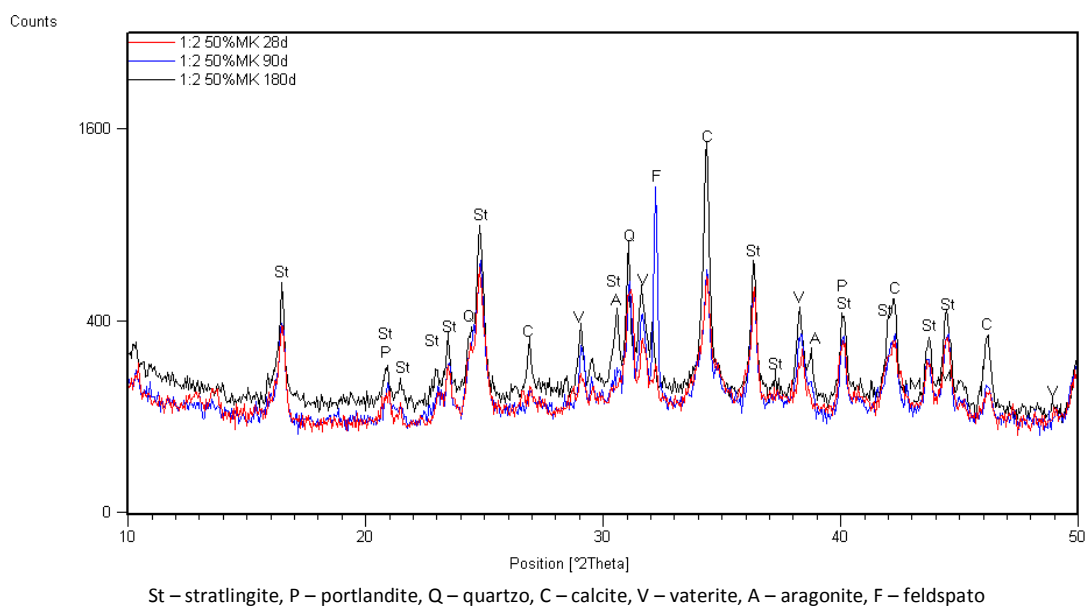


Figura 5.17 – Difractogramas das argamassas de cal aérea com traço 1:2 e 50% de Mk, aos 28, 90 e 180 dias de idade

Tal como visto na secção 4.2 a reacção do metacaulino com a cal aérea promove a formação de compostos pozolânicos, nomeadamente stratlingite, aluminato de cálcio hidratado, monocarboaluminato de cálcio hidratado e katoite. Estes componentes, associados à resistência mecânica das argamassas de cal, revelaram-se instáveis ao longo do tempo, facto que justifica o decréscimo da Rc, Rt e também do Ed nas argamassas CL com presença de metacaulino na sua formação.

Contrariamente a esta situação, as argamassas que contêm apenas cal aérea apresentam uma evolução das resistências mecânicas contínua ao longo do tempo. A lentidão da reacção de carbonatação e a ausência de compostos instáveis promove este acontecimento. A argamassa com o traço volumétrico mais forte (1:1) apresentou ainda, aos 180 dias de idade, um alto teor de portlandite, o que significa que a reacção de carbonatação ainda demorará a ficar completa, dando assim indícios que as suas propriedades mecânicas continuarão a evoluir.

- Evolução do comportamento face à água

Considera-se que o ensaio de ascensão capilar é algo particularmente sensível ao operador, uma vez que a pesagem tem de ser efectuada após remoção de parte da água superficial da base e a altura de água também é mantida por aferição manual. O facto dos ensaios aos 180 dias terem sido realizados pelo autor deste trabalho, e os de idades anteriores terem sido realizados por outros autores, pode condicionar a comparabilidade dos resultados. Do mesmo modo as condições ambientes de secagem também são muito importantes e, pelo facto do trabalho onde os valores obtidos a idades mais jovens não estar ainda publicado, podem ter ocorrido aí alterações que não são ainda possíveis de considerar. No entanto considerou-se efectuar a comparação possível.

Quanto ao comportamento face à água verifica-se que, relativamente à ascensão capilar, a quantidade total de água absorvida foi semelhante aos 90 e 180 dias (a metodologia de ensaio utilizada aos 28 dias torna-o dificilmente comparável). No entanto, a velocidade inicial de absorção aumentou entre os ensaios realizados às diferentes idades. Na Figura 5.18 é possível verificar um aumento do CC em todas as argamassas ao longo do tempo, bastante significativo em algumas. A alteração deste parâmetro pode estar relacionada com a evolução da estrutura porosa das argamassas, difícil de avaliar pela porosidade aberta, visto que os resultados são bastante semelhantes entre si.

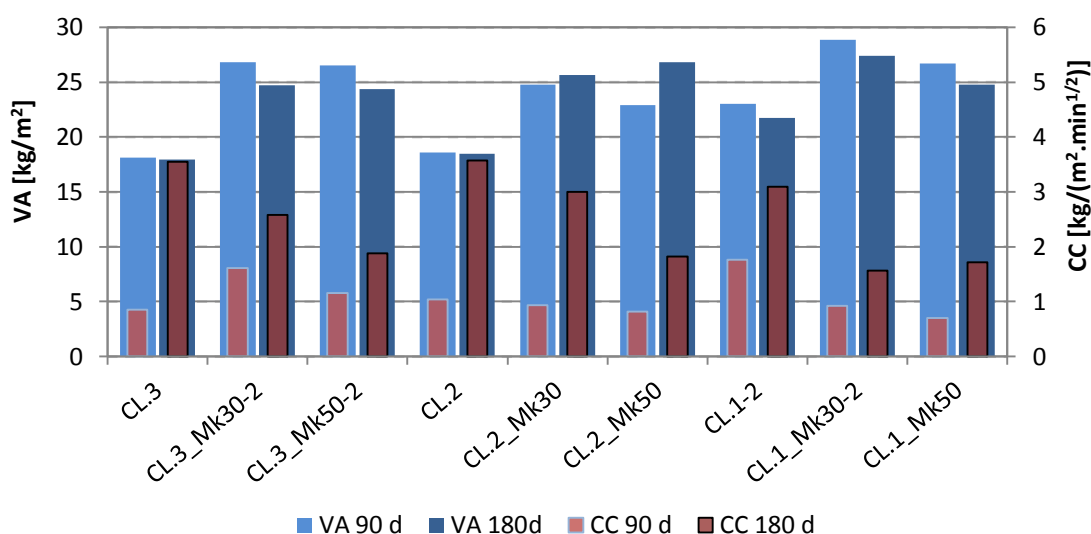


Figura 5.18 – Evolução com a idade da absorção capilar das argamassas de CL

Relativamente à secagem das argamassas, para que os ensaios fossem comparáveis com o estudo realizado por Branco (a publicar em 2013), foram determinados os índices de secagem considerando o tempo final de 505 horas, apresentados no Quadro 5.4. A Figura 5.19 demonstra graficamente a sua evolução dos 90 para os 180 dias de cura.

Sabendo que um maior IS representa uma maior dificuldade de secagem, analisando a Figura 5.19 constatam-se duas situações diferentes: umas argamassas apresentaram maior dificuldade da secagem com a evolução com a idade, enquanto outras registaram uma maior facilidade, nomeadamente as argamassas de traço 1:1 com metacaulino.

Quadro 5.4 – Índices de secagem de argamassas de CL considerando o tempo final do estudo realizado por Branco (a publicar em 2012)

Argamassa	IS (505h)	
	Méd	DP
CL.3	0,27	0,013
CL.3-2	-	-
CL.3_Mk30	0,33	0,025
CL.3_Mk30-2	0,30	0,020
CL.3_Mk50	0,34	0,008
CL.3_Mk50-2	0,28	0,019
CL.2	0,24	0,042
CL.2_Mk30	0,30	0,011
CL.2_Mk50	0,36	0,030
CL.1	0,31	0,029
CL.1-2	0,35	0,016
CL.1_Mk30	0,41	0,026
CL.1_Mk30-2	0,42	0,024
CL.1_Mk50	0,38	0,015

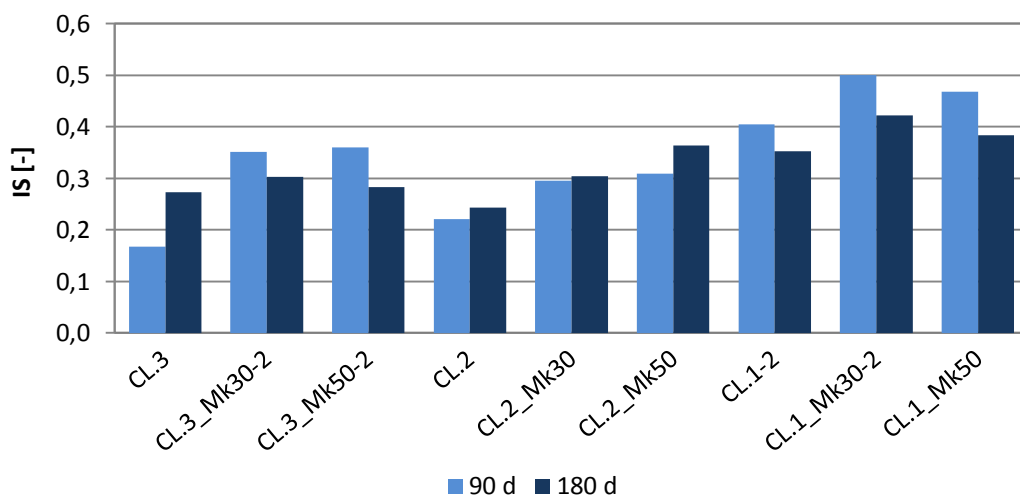


Figura 5.19 – Evolução com a idade do índice de secagem das argamassas de CL

Em suma, avaliando a evolução das resistências mecânicas com o tempo, verifica-se que o metacaulino se torna prejudicial por apresentar uma redução das suas propriedades. Os compostos pozolânicos instáveis formados, que desaparecem ao longo do tempo, provocam este facto. A velocidade inicial de absorção capilar também piora ao longo do tempo, neste caso independentemente do teor de metacaulino. Relativamente à dificuldade de secagem, as argamassas CL apresentaram diferentes evoluções entre si.

5.2. Resultados obtidos em argamassas de cal hidráulica natural

No Quadro 5.5 apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios de caracterização mecânica; no Quadro 5.6 apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios de absorção capilar e de secagem; no Quadro 5.7 apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios de porosidade aberta, massa volúmica aparente, condutibilidade térmica e resistência aos sulfatos.

Quadro 5.5 – Resultados das argamassas de cal hidráulica natural: módulo de elasticidade dinâmico, resistência à tracção por flexão e à compressão

Argamassas de cal hidráulica natural						
Designação	Características mecânicas [MPa]					
	Ed		Rt		Rc	
	Méd	DP	Méd	DP	Méd	DP
NHL.3_Lm_Hc	2969	285	0,36	0,06	0,90	0,11
NHL.3_Sm_Sc	1655	95	0,17	0,02	0,35	0,02
NHL.3_Sm_Hc	2361	486	0,39	0,08	1,09	0,22
NHL.3_Sm_Hc_10Mk	2373	437	0,36	0,05	1,45	0,04
NHL.3_Sm_Sc_10Mk	1508	37	0,19	0,01	1,07	0,14
NHL.3_Lm_Hc_5Mk	3708	153	0,44	0,06	1,83	0,09
NHL.3_Lm_Hc_10Mk	2602	64	0,36	0,05	1,57	0,14
NHL.3_Lm_Hc_20Mk	3106	156	0,48	0,04	1,82	0,06

Quadro 5.6 – Resultados das argamassas de cal hidráulica natural: coeficiente de capilaridade, valor assintótico, índice taxa e coeficiente de secagem

Argamassas de cal hidráulica natural										
Designação	Absorção capilar				Secagem					
	CC [kg/(m ² .min ^{1/2})]		VA [kg/m ²]		IS [-]		TS [kg/(m ² .h)]		CS [kg/(m ² .h ^{1/2})]	
	Méd	DP	Méd	DP	Méd	DP	Méd	DP	Méd	DP
NHL.3_Lm_Hc	2,99	0,07	21,6	1,6	0,20	0,03	0,092	0,011	1,79	0,15
NHL.3_Sm_Sc	4,74	0,10	21,4	0,8	0,15	0,03	0,124	0,020	1,91	0,09
NHL.3_Sm_Hc	3,22	0,42	23,6	2,3	0,23	0,00	0,088	0,016	1,80	0,16
NHL.3_Sm_Hc_10Mk	2,90	0,75	22,8	4,2	0,21	0,02	0,125	0,019	1,73	0,34
NHL.3_Sm_Sc_10Mk	3,15	0,23	23,5	1,5	0,24	0,03	0,083	0,002	1,83	0,03
NHL.3_Lm_Hc_5Mk	2,85	0,23	21,9	0,7	0,20	0,02	0,122	0,027	1,72	0,09
NHL.3_Lm_Hc_10Mk	2,55	0,20	23,1	0,6	0,25	0,02	0,082	0,006	1,80	0,11
NHL.3_Lm_Hc_20Mk	3,22	0,31	24,2	1,0	0,30	0,02	0,118	0,032	1,57	0,04

Quadro 5.7 – Resultados das argamassas de cal hidráulica natural: porosidade aberta, massa volúm. aparente, condutibilidade térmica e variação de massa aos 20 ciclos de ataque por sulfatos

Argamassas de cal hidráulica natural								
Designação	Porosidade aberta [%]		Massa volúm. ap. [kg/m ³]		Cond. térm. λ [W/m.K]		Res. Sulfatos Δm 20c [%]	
	Méd	DP	Méd	DP	Méd	DP	Méd	DP
NHL.3_Lm_Hc	28,2	0,4	1814	20	0,71	0,02	-52,6	15,5
NHL.3_Sm_Sc	28,4	0,9	1804	17	0,59	0,00	-82,5	16,7
NHL.3_Sm_Hc	28,4	1,9	1789	31	0,74	0,01	-25,5	17,1
NHL.3_Sm_Hc_10Mk	29,3	0,6	1771	13	0,73	0,03	-26,2	13,4
NHL.3_Sm_Sc_10Mk	28,5	0,3	1801	9	0,63	0,01	-48,4	36,3
NHL.3_Lm_Hc_5Mk	27,8	0,5	1814	1	0,73	0,01	-20,9	18,5
NHL.3_Lm_Hc_10Mk	30,2	2,7	1725	71	0,68	0,01	-38,7	18,2
NHL.3_Lm_Hc_20Mk	30,2	0,5	1732	7	0,79	0,04	-22,5	26,5

5.2.1. Análise global de resultados das argamassas aos 180 dias

Observou-se, tal como nas argamassas de cal aérea, uma relação entre os resultados obtidos na resistência à tracção e o módulo de elasticidade dinâmico (Figura 5.20). As argamassas sujeitas a cura *standard* apresentaram, independentemente da utilização de metacaulino na sua constituição, os piores resultados de características mecânicas aos 180 dias.

O tempo de amassadura não revelou qualquer influência significativa nas características mecânicas de NHL. Quanto à influência do teor de metacaulino verifica-se que não existe uma proporcionalidade das características mecânicas com a quantidade de pozolana presente na sua constituição. As argamassas com 5 e 20% de Mk apresentaram as maiores resistências mecânicas (R_c e R_t), ainda assim a argamassa com 20% desta pozolana apresenta um módulo de elasticidade semelhante à argamassa que contém apenas NHL.

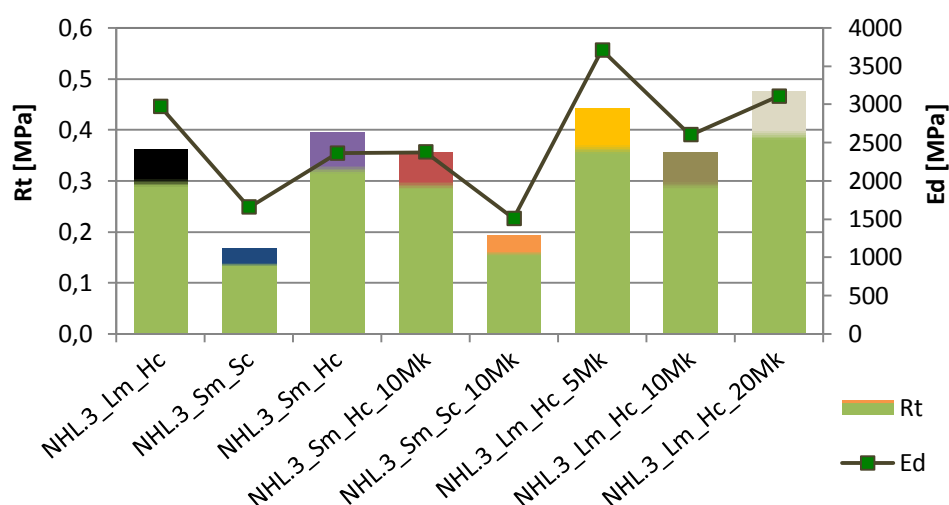


Figura 5.20 – Relação entre resistência à tracção e módulo de elasticidade dinâmico das argamassas NHL

Tal como nas argamassas de CL, a presença de metacaulino nas argamassas de NHL reduz o quociente R_t/R_c das mesmas. Comparando estes resultados com os de E_d (Figura 5.21) verifica-se que nas argamassas sem Mk, um menor E_d corresponde a um maior R_t/R_c (tal como seria expectável), relação esta que não se verifica nas argamassas com metacaulino.

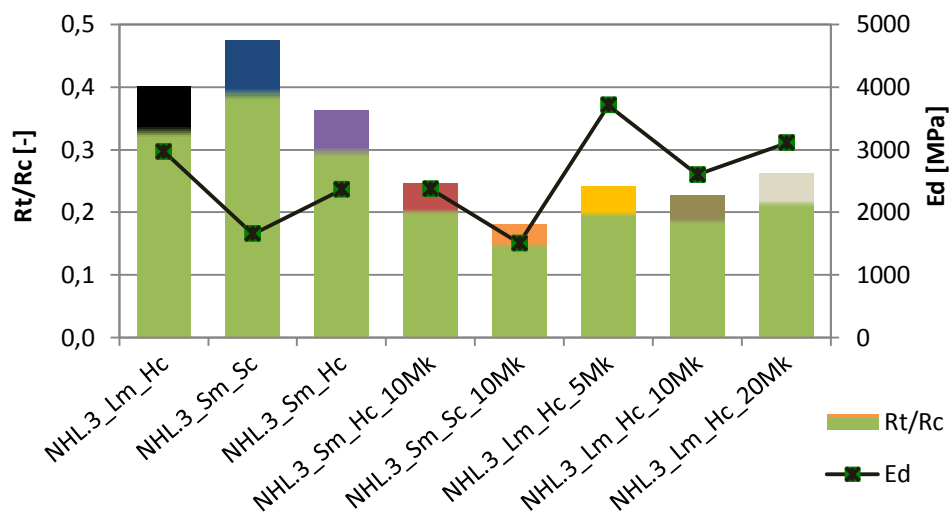


Figura 5.21 – Quociente entre resistência à tracção e à compressão (deformabilidade) e relação com o módulo de elasticidade dinâmica das argamassas de NHL

Na Figura 5.22 apresenta-se a relação entre a absorção capilar e a capacidade de secagem das argamassas de NHL.

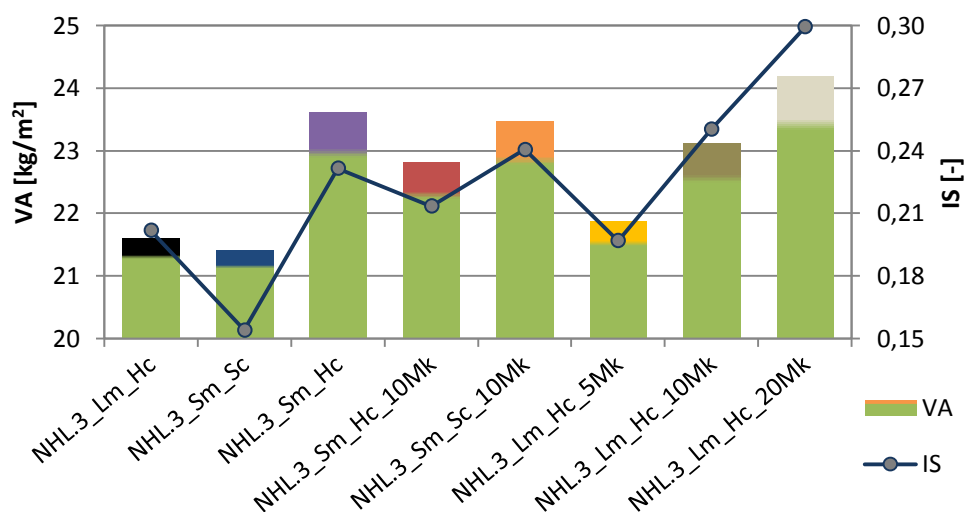


Figura 5.22 – Relação entre a absorção capilar (VA) e o Índice de Secagem das argamassas NHL

Verifica-se que as argamassas de NHL que apresentam maior quantidade total de água absorvida são consequentemente as que apresentam maior dificuldade de secagem (maior IS). Verifica-se que tanto o tipo de cura como o tempo de amassadura têm influência em ambas as características de comportamento face à água. Nas argamassas só com NHL verifica-se que a cura húmida e o tempo de amassadura *standard* são prejudiciais, isto é, estes factores provocam um

aumento da quantidade de água absorvida e uma maior dificuldade de secagem das argamassas. Com 10% de Mk a argamassas fabricada com um tempo de amassadura *standard* também se revelou pior, no entanto, a argamassa com cura húmida apresentou melhor comportamento face à água, ao contrário da argamassa só com NHL

Relativamente à influência do teor de metacaulino verifica-se uma relação de proporcionalidade entre a quantidade de pozolana na constituição das argamassas e o seu agravamento relativo ao comportamento face à água: quanto maior a sua quantidade em percentagem de massa utilizada, maior é a quantidade de água absorvida pelas argamassas e, consequentemente, maior a sua dificuldade em secar.

À semelhança das argamassas de cal aérea com o mesmo traço volumétrico (1:3), as de NHL apresentaram um padrão de degradação contínuo ao longo do decorrer do ensaio, com perda de consistência.

Comparando a resistência à tracção e a sua resistência ao ataque de sulfatos, pela variação de massa ocorrida após 20 ciclos de ataque (Figura 5.23), verifica-se que as argamassas que no ensaio de determinação da Rt apresentam menores resultados (menor resistência) foram as que, de forma geral, mais se degradaram (em variação de percentagem de massa) quando sujeitos a ciclos de imersão/secagem, em solução com sulfatos.

As argamassas submetidas a cura com 65% de HR (Sc) apresentam menor deformabilidade (Ed), menores resistências e pior resistência ao ataque de sulfatos. A quantidade de metacaulino presente nas argamassas não apresenta uma influência significativa em qualquer dos parâmetros.

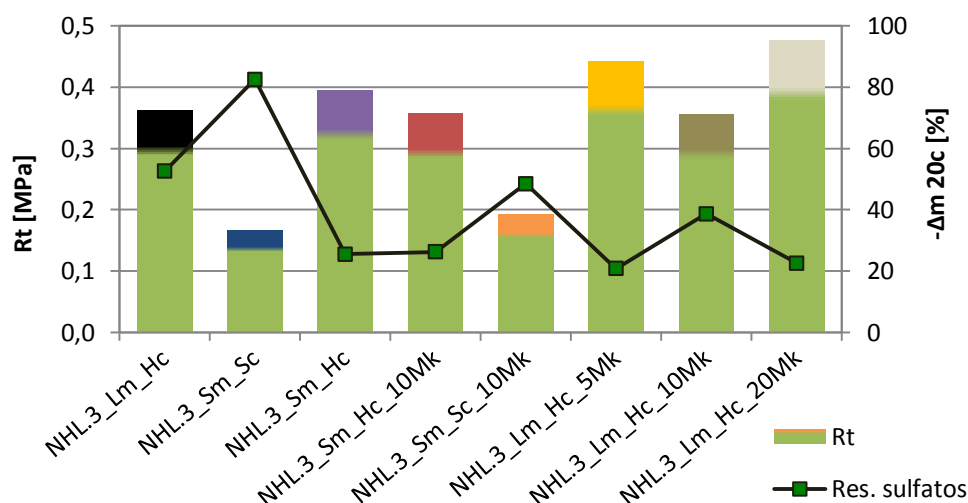


Figura 5.23 – Relação entre a resistência à tracção e a variação de massa aos 20 ciclos de ataque por sulfatos (Δm_{20c} [%]) das argamassas NHL

5.2.2. Evolução com a idade

A avaliação da evolução com a idade das argamassas de cal hidráulica natural é realizada por comparação das ensaiadas pelo autor da presente dissertação com os resultados obtidos por Carneiro (2012).

- Evolução das características mecânicas

Na Figura 5.24, Figura 5.25 e Figura 5.26 apresentam-se as evoluções com a idade do módulo de elasticidade dinâmico (E_d) e das resistências à tracção (R_t) e compressão (R_c) respectivamente.

As características mecânicas de todas as argamassas de cal hidráulica ensaiadas diminuíram com a idade, inclusive as que não contêm metacaulino na sua constituição, o que não se verifica nas argamassas de CL. Apesar de algumas argamassas terem apresentado uma evolução positiva destas características dos 28 para os 90 dias verifica-se que aos 180 dias os resultados relativos ao módulo de elasticidade e resistências mecânicas são inferiores quando comparados com idades mais jovens.

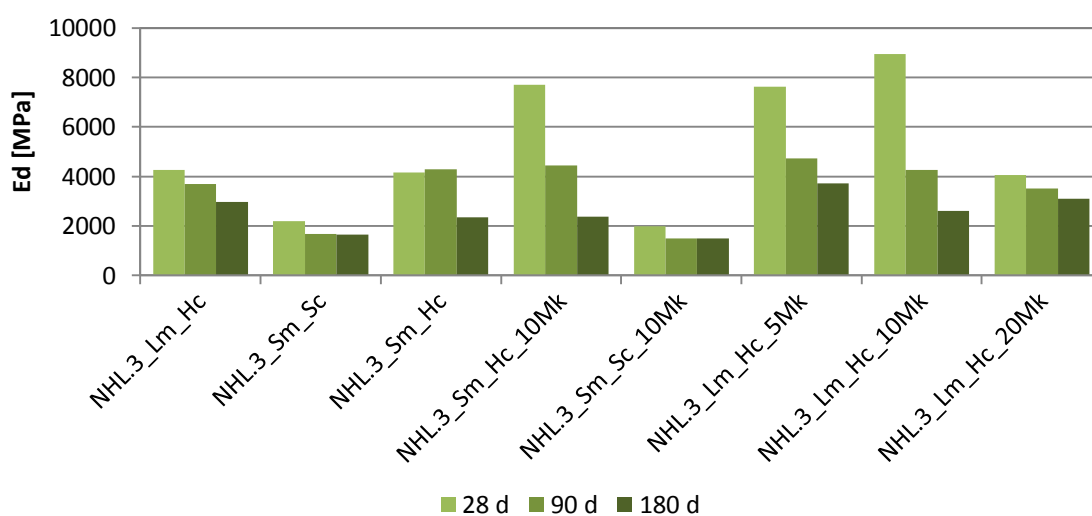


Figura 5.24 – Evolução com a idade do módulo de elasticidade dinâmico das argamassas de NHL

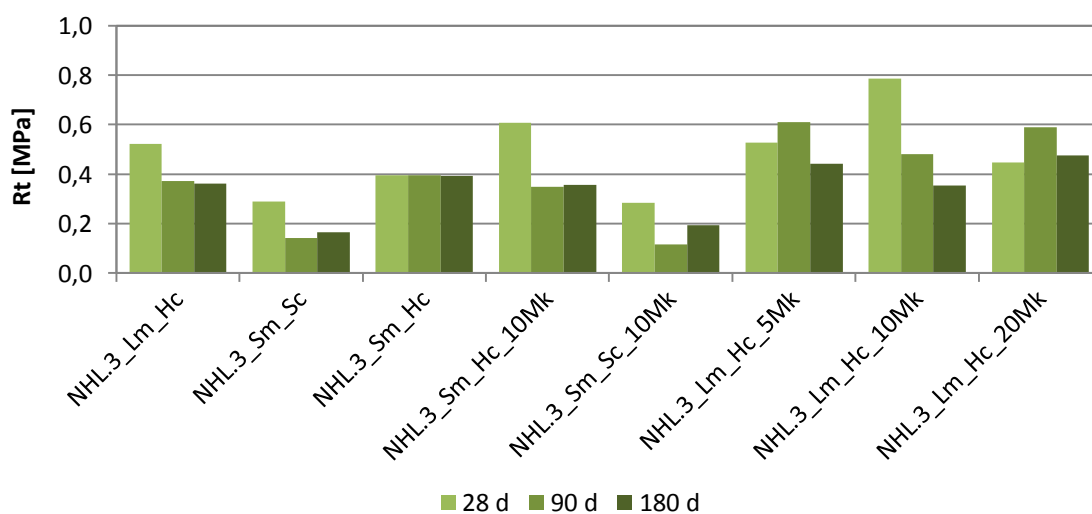


Figura 5.25 – Evolução com a idade da resistência à tracção das argamassas de NHL

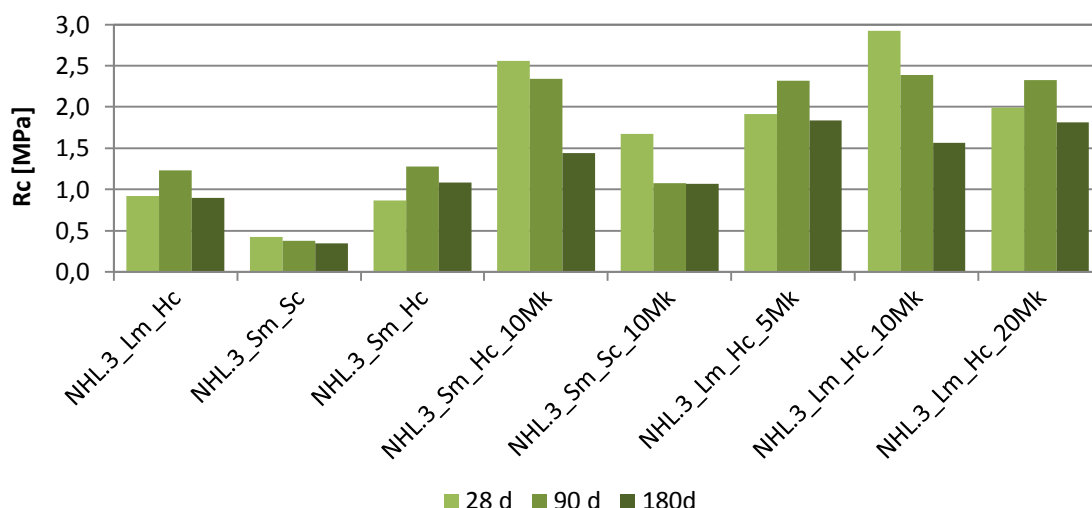


Figura 5.26 – Evolução com a idade da resistência à compressão das argamassas de NHL

• Evolução da composição química e mineralógica

Os diferentes teores de metacaulino utilizados em substituição de massa equivalente de NHL5 apresentaram diferentes tipos e intensidades de compostos mineralógicos formados. Aos 28 dias (Figura 5.27) as argamassas com metacaulino na sua composição apresentam uma maior evolução das reacções de hidratação/pozolânica, visto que nestas a presença de portlandite (P) é menor e, em consonância, a presença de compostos hidráulicos/pozolânicos é maior. Com 10% de Mk verifica-se um aumento de M em relação à argamassa com 5% de MK, surgindo ainda os compostos Hc e V. A utilização de 20% de Mk provoca uma diminuição de M e um acréscimo de Hc.

Aos 180 dias (Figura 4.64) verifica-se uma diminuição dos compostos pozolânicos (M e D) e a falta de portlandite, o que justifica a redução das propriedades mecânicas.

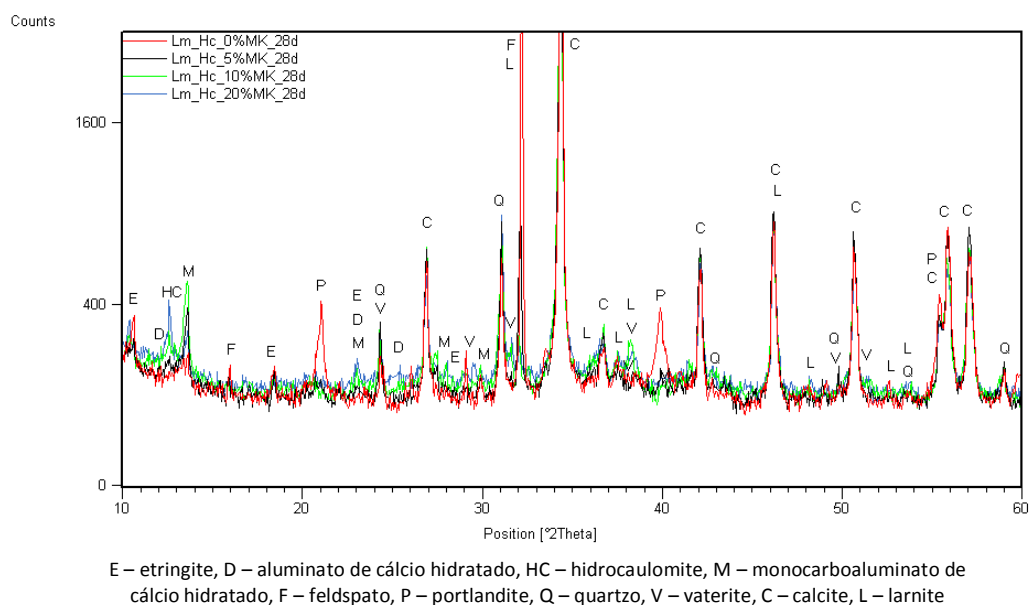


Figura 5.27 – Difractogramas das argamassas NHL, avaliando a influência do teor de Mk aos 28 dias

Analisando a Figura 5.27 e comparando com a Figura 5.11 e Figura 5.12 verifica-se que o composto hidrocaulomite (Hc) não contribui para as propriedades mecânicas das argamassas de NHL, visto que, apesar de se encontrar, aos 28 dias, mais presente na argamassa com 20% de Mk que na com 10%, esta apresenta menor resistência mecânica. Contrariamente a este composto, a presença de monocarboaluminato de cálcio hidratado (M) revela-se bastante importante nas características mecânicas.

Por análise de DTG (Figura 5.28) confirma-se a presença de portlandite livre e de compostos pozolânicos aos 28 dias na argamassa só de NHL que, no entanto, são praticamente inexistentes aos 90 e 180 dias. A calcite apresenta uma evolução inversa a estes compostos: quanto maior a idade, maior a quantidade de calcite presente na argamassa.

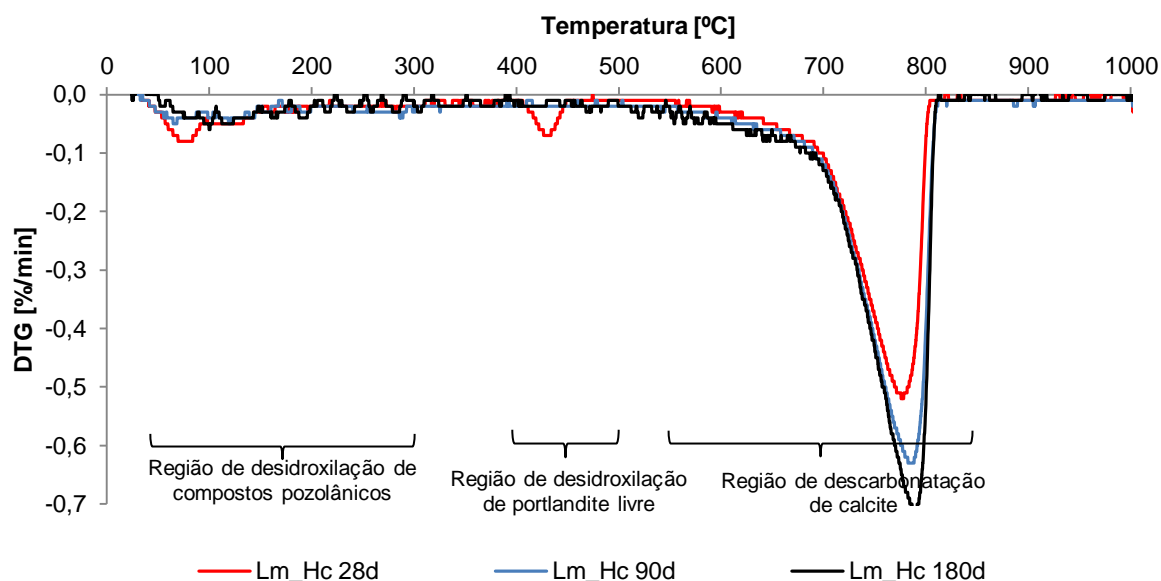


Figura 5.28 – Curvas DTG das argamassas NHL sem Mk, avaliando a sua evolução com a idade

De forma geral, analisando a Figura 5.28, confirma-se a importância dos compostos pozolânicos na resistência mecânica das argamassas de NHL. A redução dos compostos pozolânicos ao longo do tempo não é compensada com o aumento da intensidade de calcite, visto que as características desta argamassa (NHL.3_Lm_Hc) diminuem, embora ligeiramente, com a idade.

Na Figura 5.29 e Figura 5.31 apresenta-se a evolução da composição mineralógica das argamassas de cal hidráulica natural com a idade com 5% e 10% de Mk. A instabilidade dos aluminatos é verificada nas duas figuras, em que estes compostos são praticamente inexistentes aos 180 dias. Combinando este facto com a falta de portlandite (P) é possível justificar a redução da resistência mecânica com a idade.

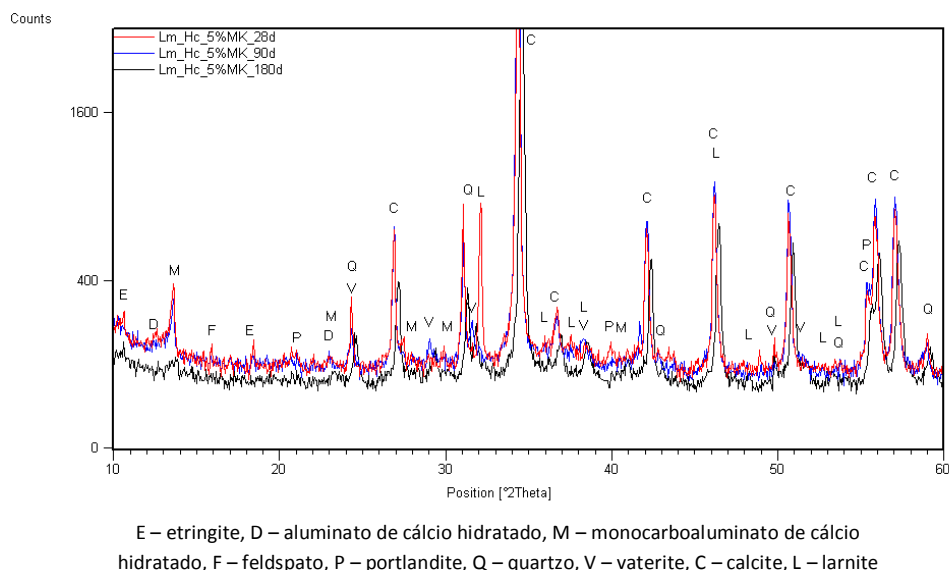


Figura 5.29 – Difractograma das argamassas NHL com 5% de Mk, avaliando a sua evolução com a idade

Na Figura 5.30 e na Figura 5.32 apresentam-se as análises DTG das mesmas argamassas. Confirma-se, mais evidentemente na argamassa com 10% de Mk, a dissipação dos compostos pozolânicos com a idade. Estes compostos, presentes aos 28 dias de cura, são praticamente inexistentes aos 90 e 180 dias. Não é detectada a presença de portlandite livre em ambas as argamassas, a qualquer das idades; o teor de calcite, já bastante intenso aos 28 dias, evolui até aos 180 dias, em ambas as argamassas.

As argamassas de cal hidráulica natural apresentam assim um comportamento semelhante às de CL: quando o Mk está presente na argamassa esta apresenta um ligeiro decréscimo das suas propriedades resistentes, justificado pela redução dos componentes pozolânicos (D, M e Hc) ao longo do tempo; quando as argamassas contêm apenas NHL a evolução com o tempo é pouco significativa. A reacção de carbonatação apresenta-se completa aos 180 dias, o que indicia que as suas propriedades já se encontram definidas com esta idade.

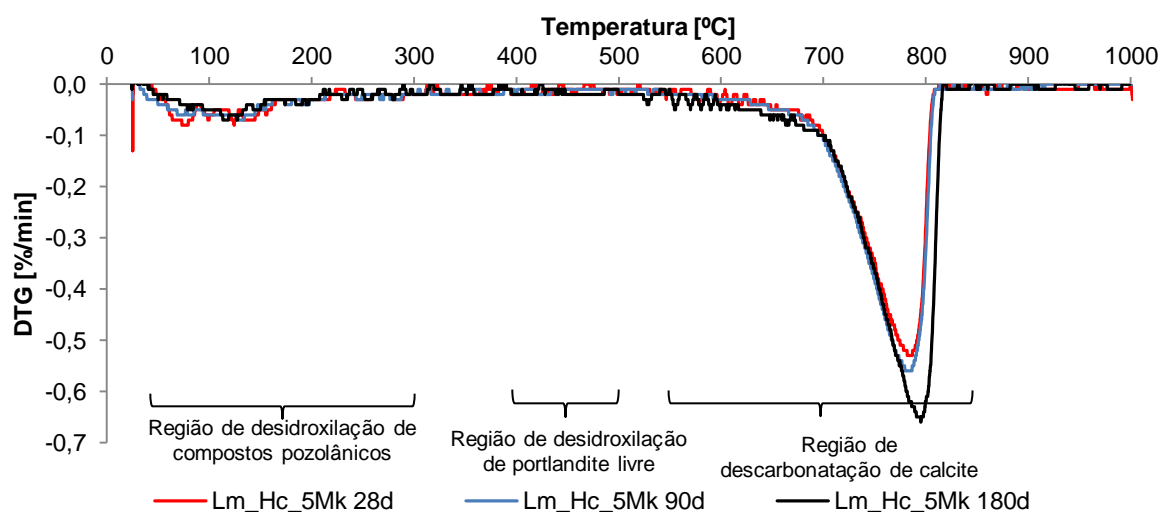


Figura 5.30 – Curvas DTG das argamassas NHL com 5% de Mk, avaliando a sua evolução com a idade

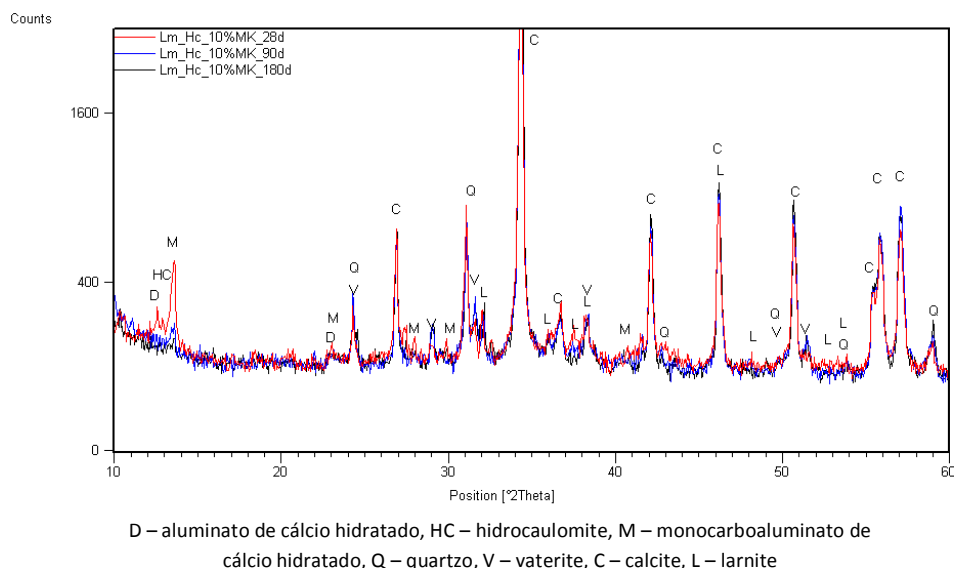


Figura 5.31 – Difractograma das argamassas NHL com 10% de Mk, avaliando a sua evolução com a idade

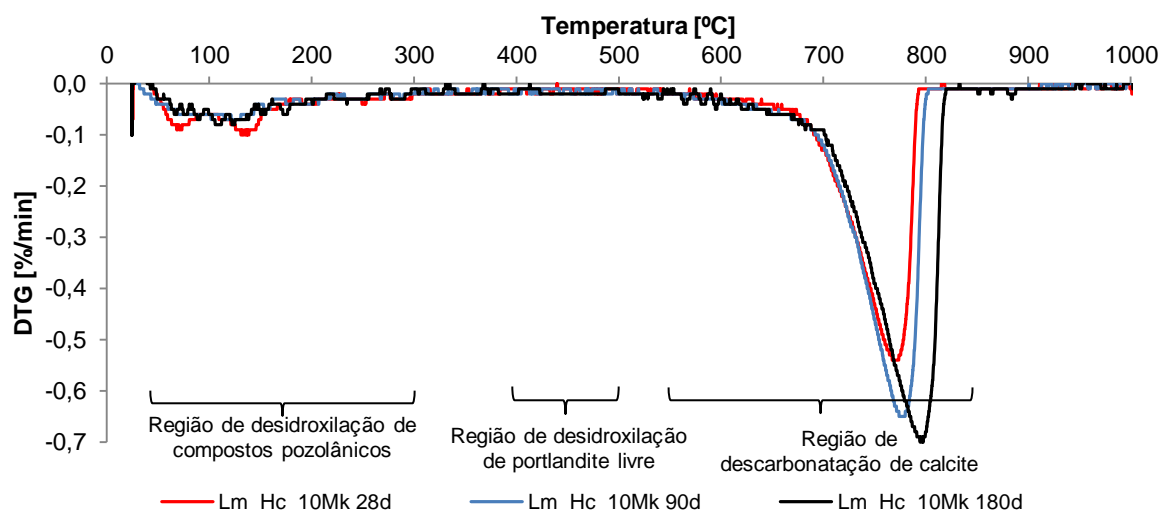


Figura 5.32 – Curvas DTG das argamassas NHL com 10% de Mk, avaliando a sua evolução com a idade

- Evolução do comportamento face à água

Tal como referido anteriormente as especificações dos ensaios de capilaridade e secagem podem condicionar a comparabilidade entre resultados obtidos por diferentes autores. Ainda assim foi realizada a comparação possível.

Na Figura 5.33 é possível verificar que todas as argamassas de NHL, tal como as de CL, apresentam um aumento da velocidade inicial de absorção capilar (CC) ao longo do tempo. A alteração da estrutura porosa com a idade, parâmetro que não foi analisado, poderia justificar este acontecimento. Contudo, a quantidade total de água absorvida por capilaridade foi semelhante nos ensaios realizados aos 90 e 180 dias, sendo na generalidade das argamassas ligeiramente menor aos seis meses.

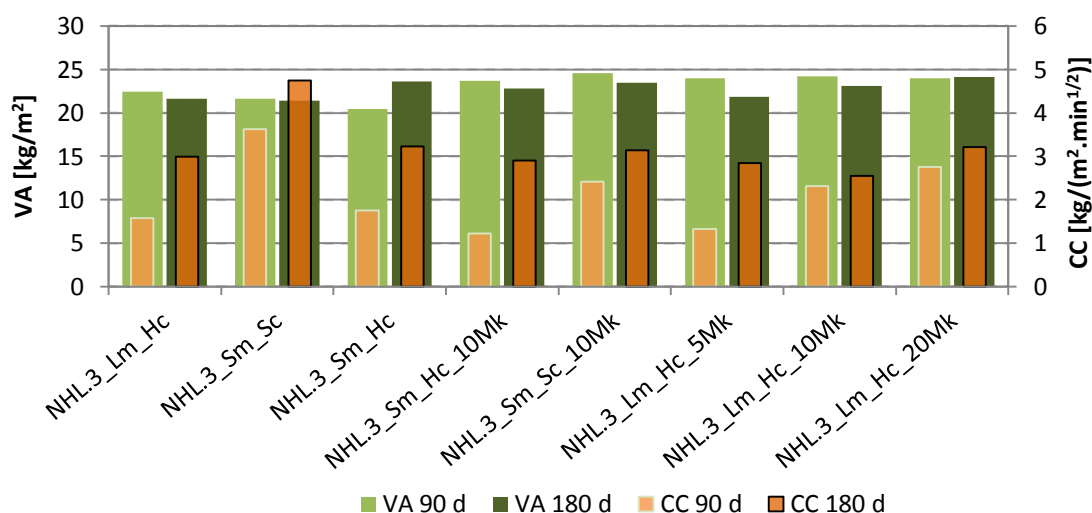


Figura 5.33 – Evolução com a idade da absorção capilar das argamassas de NHL

Relativamente ao ensaio de secagem, para que os resultados fossem comparáveis com os do estudo de Carneiro (2012), foi necessário o cálculo do IS considerando um tempo final de 338 horas (Quadro 5.8 e Figura 5.34).

Quadro 5.8 – Índices de secagem de argamassas de NHL considerando o tempo final do estudo realizado por Carneiro (2012)

Argamassa	IS (338h)	
	Méd	DP
NHL.3_Lm_Hc	0,41	0,030
NHL.3_Sm_Sc	0,33	0,031
NHL.3_Sm_Hc	0,46	0,039
NHL.3_Sm_Hc_10Mk	0,39	0,049
NHL.3_Sm_Sc_10Mk	0,46	0,019
NHL.3_Lm_Hc_5Mk	0,38	0,045
NHL.3_Lm_Hc_10Mk	0,47	0,011
NHL.3_Lm_Hc_20Mk	0,47	0,036

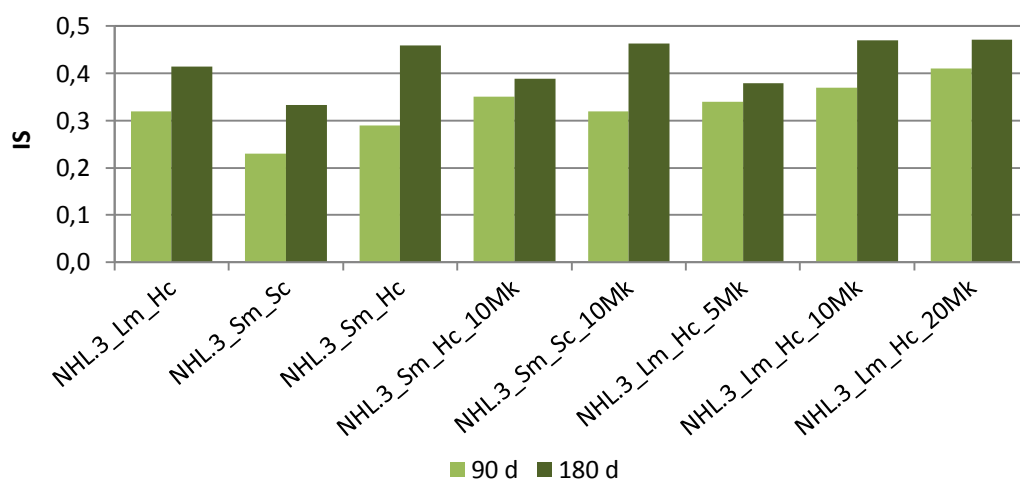


Figura 5.34 – Evolução com a idade do índice de secagem das argamassas de NHL

Sabendo que quanto maior o IS, maior a dificuldade de secagem, estas argamassas apresentaram todas um agravamento desta característica com a idade. No entanto, parece que no ensaio realizado por Carneiro a base dos provetes, por onde não devia ter ocorrido qualquer troca de vapor, esteve durante um período inicial sobre-elevada, aumentando a área de secagem e tornando os resultados dificilmente comparáveis.

5.3. Avaliação exigencial das argamassas estudadas

Comparando os resultados obtidos das argamassas ensaiadas com a bibliografia analisada na secção 2.4 é possível tirar algumas ilações.

Entre outros, a norma EN 998-1 [CEN, 2010] classifica as argamassas de acordo com os resultados obtidos da resistência à compressão aos 28 dias (de CS I a CS IV) e pelas suas propriedades de absorção capilar (Quadro 5.9). Analisando a gama de valores propostos por esta norma, referentes ao coeficiente de capilaridade, para utilização como monomassa e isolamento térmico, verifica-se que estes são bastante inferiores quando comparados com os resultados obtidos no presente estudo, visto que o valor mais baixo de CC obtido no presente estudo foi de 1,6 kg/(m².min^{1/2}).

No Quadro 5.10 e no Quadro 5.11 apresentam-se os resultados da resistência à compressão das argamassas estudadas (independentemente do seu processo de cura), obtidos anteriormente por Branco (a publicar em 2013) e Carneiro (2012), a sua categoria segundo a norma EN 998-1 [CEN, 2010] e o seu tipo de utilização possível, tendo em conta apenas a sua Rc.

Quadro 5.9 – Requisitos relativos à Rc e capilaridade de acordo com a classificação das argamassas (com base em [CEN, 2010])

Tipo de argamassa	Rc [MPa] (28d)	Capilaridade
Uso geral ou de cor	≥ 0,4	Não especificado
Monomassa		$0,2 \leq CC \leq 0,4 \text{ kg/(m}^2\cdot\text{min}^{1/2})$
Leve	≥ 0,4 a ≤ 7,5	Não especificado
Isolamento térmico	≥ 0,4 a ≤ 5,0	$CC \leq 0,4 \text{ kg/(m}^2\cdot\text{min}^{1/2})$

Quadro 5.10 – Classificação das argamassas de cal aérea segundo o seu tipo de utilização (baseado na norma EN 998-1 [CEN, 2010])

Argamassas de cal aérea			
Designação	Rc 28d [MPa]	Categoria EN 998-1	Utilização
CL.3-2	0,1	-	Nenhuma
CL.2	0,3		
CL.3_Mk30-2	1,2	CS I	Qualquer
CL.1-2	0,4		
CL.3_Mk50-2	2,8	CS II	Qualquer
CL.2_Mk30	3,0		
CL.2_Mk50	6,3	CS IV	Uso geral, colorida ou monocamada
CL.1_Mk30-2	6,9		
CL.1_Mk50	13,5		

Quadro 5.11 – Classificação das argamassas de cal hidráulica natural segundo o seu tipo de utilização (baseado na norma EN 998-1 [CEN, 2010])

Argamassas de cal hidráulica natural			
Designação	Rc 28d [MPa]	Categoria EN 998-1	Utilização
NHL.3_Sm_Sc	0,4	CS I	Qualquer
NHL.3_Lm_Hc	1,2		
NHL.3_Sm_Hc	1,3		
NHL.3_Sm_Sc_10Mk	1,1		
NHL.3_Sm_Hc_10Mk	2,3	CS II	Qualquer
NHL.3_Lm_Hc_5Mk	2,3		
NHL.3_Lm_Hc_10Mk	2,4		
NHL.3_Lm_Hc_20Mk	2,3		

Verifica-se que as argamassas de cal aérea com traço 1:3 e 1:2 sem Mk apresentam resultados de Rc insuficientes para obterem classificação segundo a norma e consequentemente não devem ser aplicadas como revestimentos. Qualquer das outras argamassas tem pelo menos um tipo de aplicação possível, no que diz respeito ao cumprimento da Rc.

Verifica-se ainda, por comparação dos resultados de resistência à compressão obtidos no estudo de Carneiro (2012) aos 28 dias com os indicados pela norma NP EN 459-1 para cais de construção [IPQ, 2011], que a argamassa NHL.3_Sm_Sc, formulada com base em alguns requisitos normativos, não cumpre os requisitos mínimos para ser classificada como NHL 5. Sabendo que a respectiva argamassa apresentou um valor de 0,43 MPa de Rc, verifica-se ainda, no Quadro 5.12, que a argamassa não cumpre sequer os requisitos mínimos para obter a classificação NHL 2. Tal situação deve ficar a dever-se ao facto desta cal ter sido disponibilizada pelo fabricante (em Junho de 2011) numa fase em que a norma NP EN 459-1 ainda não estava em vigor (só entrou em vigor em Julho de 2012) e em que o fabricante ainda estava em fase de desenvolvimento do produto.

Quadro 5.12 – Resistência à compressão da cal hidráulica natural (valores característicos) [IPQ, 2011]

Tipo de cal hidráulica natural	Rc [MPa] (28d)
NHL 2	≥ 2 a ≤ 7
NHL 3,5	$\geq 3,5$ a ≤ 10
NHL 5	≥ 5 a ≤ 15

Sabendo que os requisitos estabelecidos para as características das argamassas de revestimento para edifícios antigos sugeridos por Veiga (2010) (Quadro 2.2), são referentes a ensaios aos 90 dias de idade, verifica-se, analisando os resultados obtidos por Branco (a publicar em 2013) (Quadro 5.13) e Carneiro (2012) (Quadro 5.14), que apenas seis argamassas apresentam todos os resultados dentro dos limites propostos relativos às características mecânicas (Rt: 0,2 a 0,8 MPa; Rc: 0,4 a 3,0 MPa; Ed: 2000 a 6000 MPa) e ao coeficiente de capilaridade (1,0 a 1,5 kg/m²/min^{1/2}).

Quadro 5.13 – Características das argamassas de cal aérea aos 90 dias (com base em [Branco,2013])

Argamassas de cal aérea (90 dias)				
Designação	Rt [MPa]	Rc [MPa]	Ed [MPa]	CC [kg/m ² /min ^{1/2}]
CL.3-2	0,2	0,4	3191	1,1
CL.3_Mk30-2	0,2	0,8	1629	1,6
CL.3_Mk50-2	0,6	1,9	3427	1,2
CL.2	0,4	0,6	3007	1,0
CL.2_Mk30	0,6	3,6	6370	0,9
CL.2_Mk50	1,4	7,0	8244	0,8
CL.1-2	0,4	0,7	2884	1,8
CL.1_Mk30-2	1,3	7,7	8089	0,9
CL.1_Mk50	2,6	15,3	10193	0,7

Nota: valores identificados correspondem a valores fora da gama de [Veiga,2010] para edifícios antigos

Quadro 5.14 – Características das argamassas de cal hidráulica natural aos 90 dias (com base em [Carneiro,2012])

Argamassas de cal hidráulica natural (90 dias)				
Designação	Rt [MPa]	Rc [MPa]	Ed [MPa]	CC [kg/m ² /min ^{1/2}]
NHL.3_Lm_Hc	0,4	1,2	3694	1,6
NHL.3_Sm_Sc	0,1	0,4	1690	3,6
NHL.3_Sm_Hc	0,4	1,3	4284	1,8
NHL.3_Sm_Hc_10Mk	0,3	2,3	4445	1,2
NHL.3_Sm_Sc_10Mk	0,1	1,1	1499	2,4
NHL.3_Lm_Hc_5Mk	0,6	2,3	4720	1,3
NHL.3_Lm_Hc_10Mk	0,5	2,4	4260	2,3
NHL.3_Lm_Hc_20Mk	0,6	2,3	3523	2,8

Nota: valores identificados correspondem a valores fora da gama de [Veiga,2010] para edifícios antigos

Relativamente às argamassas de cal aérea verifica-se que apenas as de traço 1:3 e 1:2 que sem metacaulino, e a argamassa CL.3_Mk50-2, respeitam todos os critérios sugeridos por Veiga (2010). As argamassas de traço 1:2 e 1:1 com adição de metacaulino apresentam resistências mecânicas que podem ser demasiado elevadas para alguns edifícios antigos, sendo a velocidade de absorção capilar demasiado baixa.

No entanto, considera-se que este valor limite inferior do CC pode existir devido à relação existente com a secagem e a absorção capilar (limite do CC para não existir demasiada dificuldade de secagem). Considerando este aspecto, sabendo que apenas algumas argamassas de cal aérea apresentaram valores de CC abaixo do valor limite, por avaliação da Figura 5.19 verifica-se que apenas as argamassas de traço 1:1 apresentam uma secagem menos expedita que as de 1:3, considerando que estas têm um bom desempenho por apresentarem valores de CC acima do limite proposto. Assim sendo, considera-se, entre as argamassas de cal aérea, que apenas as de traço

mais forte em ligante (1:1) não têm um comportamento face à água adequado para utilização como revestimento de edifícios antigos.

As argamassas de cal aérea com traço 1:3 apresentam valores próximos dos mínimos para a aplicação como rebocos, não tendo assim características necessárias para aplicação de refechamento de juntas. A argamassa CL.2_Mk50 e as de traço 1:1 com Mk, por apresentarem resistências mecânicas demasiado altas, revelam-se inadequadas para aplicação em conservação e reabilitação de edifícios. As argamassas de traço 1:3 e 1:2 com 30% de Mk, por apresentarem valores próximos dos limites propostos (que permitem alguma flexibilidade), são consideradas adequadas.

Genericamente, as argamassas de NHL apresentaram um coeficiente de capilaridade superior ao proposto para aplicação em edifícios antigos [VEIGA, 2010], à excepção das argamassas NHL.3_Sm_Hc_10Mk e NHL.3_Lm_Hc_5Mk. As argamassas sujeitas a cura *standard* (65 % de HR) apresentam Rt inferior aos limites indicados para aplicação de argamassas como reboco ou refechamento de juntas.

No entanto, como já foi referido, a presença de metacaulino nas argamassas de ambos os tipos de cal tende a baixar estas propriedades com a idade. Este comportamento pode prejudicar assim a sua aplicação. Uma redução – em alguns casos brusca – das suas propriedades mecânicas ao longo do tempo pode colocar em causa a estabilidade da argamassa.

Analisando as argamassas aos 180 dias de idade e comparando com os requisitos estabelecidos para os 90 dias, verifica-se que todas as argamassas de cal hidráulica, há excepção das que foram sujeitas a cura *standard*, apresentam características mecânicas adequadas necessárias a utilizar como argamassas de substituição, quer em rebocos, quer em refechamento de juntas, tal como as argamassas de cal aérea sem adição de metacaulino, e a argamassa CL.2_Mk30.

Como já foi referido, o metacaulino parece reduzir a velocidade inicial de absorção capilar nas argamassas de ambos os tipos de cal, propriedade que é agravada ao longo do tempo. No entanto, as argamassas que apresentam uma menor velocidade inicial de absorção capilar apresentam, na totalidade, uma maior quantidade de água absorvida, tornando-se inadequada a sua aplicação como rebocos exteriores.

Associada a esta propriedade, o índice de secagem apresenta um comportamento semelhante nas argamassas de cal aérea: a adição de metacaulino aumenta a dificuldade de expulsão da água dos seus poros, facto que não foi verificado nas argamassas de NHL, onde apenas se conclui que uma cura *standard* – na ausência de metacaulino – promove uma secagem mais expedita.

Relativamente ao comportamento ao ataque de sulfatos verifica-se que as argamassas produzidas com traço 1:2 e as argamassas só com CL de traço 1:3 e 1:1 apresentaram o melhor comportamento no ensaio realizado. As argamassas de NHL apresentaram um pior comportamento quando fabricadas com uma amassadura segundo a norma e sujeitas a cura *standard* de 65% de HR.

Tendo em conta as características analisadas verifica-se que as argamassas de cal aérea com traço volumétrico 1:2 sem metacaulino apresentam as melhores características para aplicação como argamassas de substituição, em rebocos exteriores e refechamento de juntas, onde as

exigências mecânicas e o comportamento face à água e à exposição a sais são bastante relevante. No entanto a introdução de metacaulino aumenta a velocidade inicial de endurecimento das argamassas, factor bastante benéfico especialmente nas argamassas de cal aérea e/ou quando utilizadas em ambientes húmidos. As argamassas de cal hidráulica natural também apresentaram boas propriedades a este nível, desde que fabricadas com mistura longa, sujeitas a cura húmida e com uma percentagem de metacaulino entre os 5% e os 20%, visto que melhora a sua resistência à compressão.

Uma cura húmida (95% de HR) é extremamente difícil de reproduzir em obra. No entanto, em idade jovem – entenda-se algumas semanas – esta pode ser realizada por molhagem por aspersão regular da argamassa depois de aplicada, por revestimento com manta que seja mantida molhada ou por membranas plásticas e impermeáveis que retenham a humidade.

É ainda importante referir que uma melhor distribuição granulométrica de areia pode contribuir significativamente para uma melhoria da resistência mecânica das argamassas, que em alguns casos se apresentou demasiado baixa.

6. CONCLUSÕES

6.1. Principais conclusões

A presente dissertação foi iniciada com uma reflexão teórica com base bibliográfica relativa aos temas inerentes ao estudo, desde a contextualização do mercado da construção em Portugal à caracterização das matérias primas constituintes das argamassas de cal aérea e cal hidráulica natural assim como as suas exigências funcionais. O trabalho experimental, realizado maioritariamente com base em normas europeias e procedimentos de ensaio e tratamento de resultados utilizados estabelecidos e utilizados correntemente pelos orientadores, avaliou várias propriedades mecânicas, físicas e químicas de diversas argamassas com base em cal aos 180 dias.

O estudo desenvolvido, inserido nos projectos FCT-METACAL e FCT-LIMECONTECH, avaliou a influência do traço volumétrico e do teor de metacaulino nas argamassas de cal aérea e a influência do tempo de amassadura, tipo de cura e também do teor de metacaulino de algumas argamassas de cal hidráulica natural. Após terminado, importa resumir as principais conclusões tiradas com a realização deste estudo.

Nas argamassas de cal aérea produzidas com um traço 1:3 a utilização de metacaulino em substituição de 50% da massa equivalente de CL revelou-se bastante benéfica, aos 180 dias, nas resistências à tracção e compressão. Quando produzidas com um traço 1:2 as características mecânicas são progressivamente maiores consoante o teor de metacaulino utilizado. No entanto a argamassa com 50% de metacaulino apresenta uma resistência demasiado elevada para ser utilizada como argamassa de substituição em edifícios antigos. Nas argamassas de traço mais forte, 1:1, a utilização de um teor de substituição de Mk de 30% revelou-se a argamassa mais resistente e menos deformável.

Relativamente às argamassas de cal hidráulica natural foi constatada a importância da cura húmida nas suas propriedades mecânicas. Quando submetidas a cura com HR de 95% as argamassas de NHL apresentam, aos 180 dias, maiores resistências e menor deformabilidade que as argamassas sujeitas a cura de 65% de HR, independentemente do teor de metacaulino utilizado – os teores de 5% e 20% apresentaram os valores mais elevados mas semelhantes entre si. Verificou-se ainda uma baixa influência do tempo de amassadura nestas propriedades.

Tanto nas argamassas de cal aérea como de cal hidráulica natural, as elevadas características mecânicas registadas em idade jovem diminuem com o tempo. Este facto está associado aos compostos hidráulicos/pozolânicos formados no início das reacções químicas durante o processo de cura que, por serem instáveis, desaparecem ao longo do tempo, reduzindo assim a resistência e rigidez da argamassa.

Relativamente ao comportamento face à água observou-se, nas argamassas com base em cal aérea, que traços mais fortes em ligante provocam maiores quantidades de absorção capilar. A substituição de cal por metacaulino destas argamassas provocou uma diminuição, genericamente proporcional ao teor utilizado, da velocidade inicial de absorção de água (coeficiente de capilaridade, CC); a redução do CC nas argamassas implica uma maior quantidade total de água absorvida (VA).

Os resultados obtidos no ensaio de secagem nas argamassas de cal aérea promovem conclusões análogas ao ensaio de absorção capilar: quanto mais forte em ligante for o traço volumétrico e quanto maior a percentagem de metacaulino utilizada, maior a dificuldade de secagem.

Submeter as argamassas de NHL a uma cura húmida implica a vantagem de reduzir o CC, apenas quando não contêm metacaulino. A variação do tempo de amassadura não tem qualquer influência na absorção capilar das argamassas de NHL estudadas. O teor de metacaulino utilizado é proporcional à quantidade de água absorvida por estas argamassas e à sua dificuldade de secagem. A sua utilização implica também comportamentos diferenciados quando utilizados diferentes tempos de mistura ou tipos de cura. Uma argamassa sem esta pozolana apresenta uma maior dificuldade de secagem quando curada a 95% de HR relativamente a 65% e o tempo de mistura *standard* revelou-se prejudicial comparativamente a um mais longo, no entanto o inverso é registado em ambos os parâmetros quando utilizado 10% de Mk.

A determinação da porosidade aberta demonstrou, em argamassas de CL, que quanto mais forte em ligante for o traço, maior a porosidade. A utilização da pozolana em estudo aumenta também esta propriedade nas argamassas de cal aérea, independentemente do teor utilizado. Em argamassas de cal hidráulica natural este ensaio não foi conclusivo.

O ensaio de condutibilidade térmica, apesar de meramente indicativo, registou em argamassas de cal aérea que, com o aumento do traço (maior proporção de ligante CL+Mk), se verifica uma tendência de aumento desta propriedade. De uma forma geral, a substituição de CL por Mk apresenta resultados benéficos relativamente às propriedades térmicas das argamassas. As argamassas de NHL, quando expostas a um ambiente húmido durante o período de cura, apresentam maiores valores de condutibilidade térmica. A utilização de 5 e 10% de Mk não indiciam provocar variações significativas nas propriedades de condutibilidade térmica destas argamassas, no entanto, quando é utilizado um teor de substituição de 20% é verificado um ligeiro agravamento.

Quanto ao comportamento face ao ataque de sulfatos as argamassas de cal aérea apresentaram comportamentos diferenciados de acordo com o traço volumétrico: nas argamassas de traço 1:3 o desgaste é contínuo ao longo do ensaio, visto que os provetes são mais friáveis e menos consistentes; as argamassas produzidas a um traço 1:2, independentemente do teor de metacaulino utilizado, apresentaram um bom comportamento ao longo de todo o ensaio, não apresentando perdas de massa; nas argamassas de traço mais forte, 1:1, a degradação é repentina, provocada por fendas que surgem e que se agravam ao longo dos ciclos. O tempo de amassadura *standard* nas argamassas de NHL apresentou ser benéfico relativamente a um tempo mais longo, face à exposição aos sulfatos.

A análise da porosimetria por intrusão de mercúrio, realizada apenas nas argamassas de cal aérea, permitiu observar que as argamassas sem metacaulino apresentam uma maior quantidade de poros de maior dimensão. O mesmo se verificou em traços mais fracos em ligante. De facto, a análise da estrutura microporosa das argamassas permitiu algumas observações importantes:

- as argamassas com maior quantidade de poros finos (0,17 μm) são as que apresentam maior resistência mecânica;
- a quantidade de poros finos é proporcional à quantidade de água absorvida (VA);

- a velocidade de absorção inicial (CC) é tanto maior quanto maior a quantidade de poros de grandes dimensões (109 μm);
- as argamassas com maior quantidade de poros de grandes dimensões apresentam maior desenvolvimento no processo de carbonatação da cal (maior quantidade de calcite formada).

Nestas argamassas de cal aérea verificou-se que, de um modo geral a porosidade aberta determinada por pesagem hidrostática conduz a valores aceitáveis quando comparados com os da porosimetria de mercúrio.

A análise mineralógica e térmica das argamassas de ambos os tipos de cal permitiu a observação de compostos pozolânicos formados em idade jovem – nomeadamente stratlingite, aluminato de cálcio hidratado, monocarboaluminato de cálcio hidratado e katoite – que por serem instáveis se dissiparam ao longo do tempo. O facto de estes estarem associados às características mecânicas das argamassas justifica o seu decréscimo com a idade.

O estudo desenvolvido cumpriu assim os objectivos inicialmente propostos de caracterização das propriedades mecânicas, físicas e químicas de argamassas no seu estado endurecido. Os resultados obtidos contribuíram ainda para a possível optimização de argamassas com base em cal aérea e cal hidráulica natural, tal como as vantagens na utilização de metacaulino.

Alguns destes resultados foram recentemente publicados [FARIA *et al.*, 2012c] e encontra-se em desenvolvimento, por parte do autor do presente estudo, a realização de um artigo com objectivo de publicar em revista internacionalmente prestigiada.

6.2. Sugestões para desenvolvimentos futuros

O presente estudo permitiu avaliar a influência de variados parâmetros em argamassas de cal, nomeadamente a utilização de metacaulino na sua constituição. De forma a expandir o conhecimento nesta área de investigação considera-se importante o desenvolvimento futuro dos seguintes aspectos:

- estabilização da humidade das argamassas antes da realização do ensaio de determinação do módulo de elasticidade (através da medição da frequência de ressonância fundamental);
- caracterização das argamassas em idades mais avançadas (1 ano, 5 anos);
- avaliação de argamassas com base em cal sujeitas a outras condições de cura, nomeadamente em condições naturais;
- avaliação de argamassas de cal aérea com diferentes quantidades de metacaulino;
- avaliação da influência do suporte nas características das argamassas;
- análise da retracção dimensional ocorrida em aplicações em diferentes painéis in situ;
- estudo das características de argamassas com outras cais NHL5, produzidas após a entrada em vigor legal da norma das cais de construção.

BIBLIOGRAFIA

- AECOPS (2009) – *O Mercado da Reabilitação. Enquadramento, Relevância e Perspectivas*. Associação de Empresas de Construção e Obras Públicas. (Disponível em http://prewww.aecops.pt/pls/daecops3/WEB_EXTRACT_EXTERNAL.GET_EXTERNAL?code=29390781&col_ext=FILE1&tab=blist_downloads, acedido em Agosto de 2012)
- AECOPS (2011) – *Uma Visão revisitada do futuro – Uma tragédia anunciada?* Associação de Empresas de Construção e Obras Públicas. (Disponível em: http://prewww.aecops.pt/pls/daecops3/WEB_EXTRACT_EXTERNAL.GET_EXTERNAL?code=31828866&col_ext=FILE1&tab=blist_downloads, acedido em Agosto de 2012)
- APPLIED PRECISION (s.d.) – *User's guide. ISOMET Model 2104 Heat Transfer Analyzer*.
- BORSOI, G.; VEIGA, M.R.; SANTOS SILVA, A. (2012) – *Consolidação de argamassas históricas de revestimentos com produtos compatíveis – avaliação de eficácia*. 4º Congresso Português de Argamassas e ETICS, Coimbra.
- BRAGA-REIS, M. (1994) – *Difracção de Raios X. Curso Técnicas de Caracterização Química e Físico-Química de Materiais*. Lisboa, LNEC.
- BRANCO, T. (2013) – *Evolução e comparação das características de argamassas de cal aérea com adição de metacaulino*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Construção, Universidade Nova de Lisboa (em fase de publicação).
- BRITO, V.; GONÇALVES, T.; FARIA, P. (2011) – *Coatings applied on damp building substrates: performance and influence on moisture transport*. Journal of Coatings Technology and Research 8 (4), 513-525.
- CÂMARA MUNICIPAL DE LISBOA (CML) (2011) – *Estratégia de reabilitação urbana de Lisboa 2011-2024*. (Disponível em: <http://ulisses.cm-lisboa.pt/data/001/0055/>, acedido em Agosto de 2012)
- CARNEIRO, J. (2012) – *Caracterização de argamassas de cal hidráulica natural com metacaulino*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Construção, Universidade Nova de Lisboa.
- COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION (CEN) (1998) – EN 1015-2: 1998 – *Methods of test for mortars for masonry. Part 2: Bulk sampling of mortars and preparation of test mortars*. Brussels.
- CEN (1999a) – EN 1015-3:1999 – *Methods of test for mortar for masonry. Determination of consistence of fresh mortar (by flow table)*. Brussels.
- CEN (1999b) – EN 1015-11: 1999 – *Methods of test for mortar for masonry – Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar*. Brussels.
- CEN (2000) – EN 197-1: 2000 – *Cement – Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements*. Brussels.

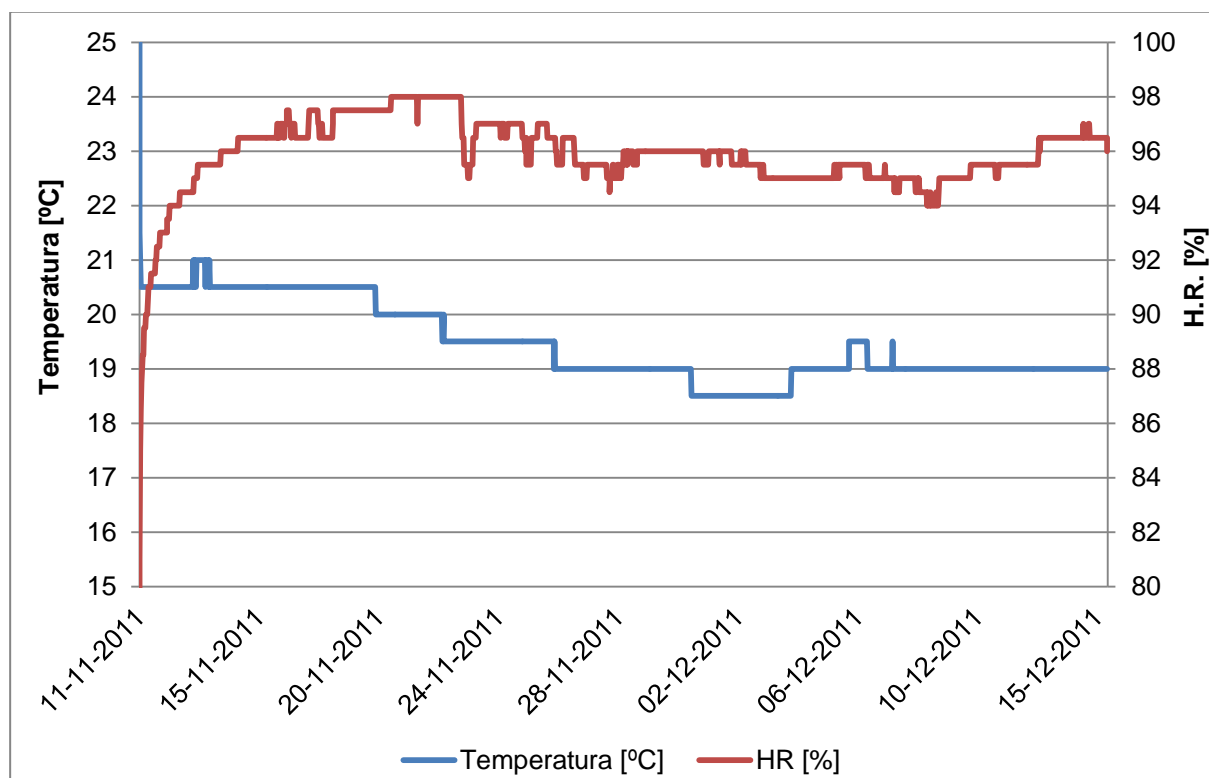
- CEN (2002) – EN 1015-18:2002 – *Methods of test for mortars for masonry. Part 18: Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar*. Brussels.
- CEN (2009) – EN 15801 – *Conservation of cultural property. Test methods. Determination of water absorption by capillarity*. Brussels.
- CEN (2010) – EN 998-1 – *Specification for mortar for masonry - Part 1: Rendering and plastering mortar*. Brussels.
- COUTINHO, J. (2006) – *Materiais de Construção 2: 1ª Parte – Ligantes e Caldas*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- CRUZ, T.; SANTOS-SILVA, A. (2006) – *Caracterização de argamassas da Igreja de Nossa Sr.^a da Assunção (Elvas) e do castelo da Amieira do Tejo (Nisa)*. Relatório LNEC 215/06-NMM.
- ERACAREERS (s.d.) – The pan-European Researcher's Mobility Portal. – <http://www.eracareers.pt/opportunities/index.aspx?task=showAnuncioOportunities&jobId=18229&lang=pt&idc=1>, <http://www.eracareers.pt/opportunities/index.aspx?task=showAnuncioOportunities&jobId=17293&lang=pt&idc=1> (acedidos em Agosto de 2012)
- ECONÓMICO (2012) – http://economico.sapo.pt/noticias/desapareceram-29-construtoras-por-dia-ate-junho_149838.html. (acedido em Agosto de 2012)
- FARIA, P. (2004) – *Argamassas de revestimento para alvenarias antigas. Contribuição para o estudo da influência dos ligantes*. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil – Reabilitação do Património Edificado, Universidade Nova de Lisboa.
- FARIA, P. (2011) – *Projecto METACAL – Procedimentos de ensaio*. DEC-FCT-UNL.
- FARIA, P. (2012a) – *Argamassas Sustentáveis*. 2ª Conferência Construção e Reabilitação Sustentável de Edifícios no Espaço Lusófono, FCT-UNL.
- FARIA, P.; SILVA, V.; FLORES-COLEN, I. (2012b) – *Argamassas de cal hidráulica natural e pozolanas artificiais: avaliação laboratorial*. 4º Congresso Português de Argamassas e ETICS, Coimbra.
- FARIA, P.; SILVA, V.; GRILO, J.; BANDEIRA, A.; BRANCO, T. MERGULHÃO, D. (2012c) – *Lime based mortars for ceramic tile application: the influence of the lime, the use of a metakaolin and the curing*. Congresso AZULEJAR 2012, Aveiro.
- GAMEIRO, A.; SANTOS-SILVA, A.; VEIGA, R.; VELOSA, A. (2012a) – *Hydration products of lime-metakaolin pastes at ambient temperature with ageing*. Thermochimica Acta 535, 36-41.
- GAMEIRO, A.; SANTOS-SILVA, A.; FARIA, P.; BRANCO T.; VEIGA, R.; VELOSA, A. (2012b) – *Physical and chemical assessment of lime-metakaolin mortars: Influence of binder:aggregate ratio*.

- GIBBONS, P. (1997) – *Pozzolans for lime Mortars*. The conservation and repair of ecclesiastical buildings. (Disponível em: <http://www.buildingconservation.com/articles/pozzo/pozzo.htm>., acedido em Agosto de 2012)
- GONÇALVES, T. (2007) – *Salt crystallization in plastered or rendered walls*. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Universidade Técnica de Lisboa.
- HENRIQUES, F. (2007) – *Comportamento higrotérmico de Edifícios*. DEC-FCT-UNL.
- HENRIQUES, F.; FARIA, P. (2006) – *Argamassas de substituição na conservação do património*. Construção Magazine 16, 38-45.
- HENRIQUES, F.; FARIA, P. (2008) – *O papel da investigação no estudo das argamassas de substituição na conservação do património*. Revista Engenharia Civil – Universidade do Minho 31, 29-37.
- INSTITUTO NACIONAL DE ESTATÍSTICA (INE) (2012) – *Estatísticas da Construção e Habitação 2011*. Lisboa.
- INSTITUTO PORTUGÊS DA QUALIDADE (IPQ) (2000) – NP EN 1097-3:2000 – *Ensaio para determinação das propriedades mecânicas e físicas dos agregados – Parte 3: Método para determinação da massa volúmica e dos vazios*. Caparica.
- IPQ (2007) – NP EN 14146:2006 – *Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação do módulo de elasticidade dinâmico (através da medição da frequência de ressonância fundamental)*. Caparica.
- IPQ (2008) – NP EN 1936:2008 – *Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação das massas volúmicas real e aparente e das porosidades total e aberta*. Caparica.
- IPQ (2010) – NP 4220: 2010 – *Pozolanas para betão, argamassas e caldas. Definições, requisitos e verificação da conformidade*. Caparica.
- IPQ (2011) – NP EN 459-1: 2011 – *Cal de construção. Parte 1: Definições, especificações e critérios de conformidade*. Caparica.
- JORNAL DE NEGÓCIOS (JN) (2012) – http://www.jornaldenegocios.pt/home.php?template=SHOWNEWS_V2&id=572901. (acedido em Agosto de 2012)
- MARGALHA, M. (2011) – *Argamassas*. Documento de apoio às aulas de Conservação e Recuperação do Património, Universidade de Évora.
- RATO, V. (2006) – *Influência da microestrutura morfológica no comportamento de argamassas*. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil – Reabilitação do Património Edificado, Universidade Nova de Lisboa.
- RILEM TC 25-PEM (1980) – *Recommended tests to measure the deterioration of stone and to assess the effectiveness of treatment methods. Test nº II.5 – Evaporation curve*. Materials & Structures, 13, 204-207.

- RUSKULIS, O. (2005) – *Pozzolanas: An introduction*. Building Advisory Service and Information Network.
- SABIR, B.; WILD, S.; BAI, J.(2001) – *Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review*. Cement and Concrete Composites 23, 441-454.
- SAID-MANSOUR, M.; KADRI, E.H.; SAID, K.; MOHAMED, G.; RACHID, B. (2011) – *Influence of calcined kaolin on mortar properties*. Construction and Building Materials 25, 2275–2282.
- SWOLFS, M.; GOWMINNW, T. (2010) – *Building with lime – Exchange of experiences from producers in the field*. Sustainable Building Conference, SB10mad, Madrid.
- VEIGA, R. (2003) – *As argamassas na conservação*. Actas das 1^{as} Jornadas de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro, Coleção Comunicações, LNEC, Lisboa.
- VEIGA, R. (2010) – *Lime-based mortars: viability for use as substitution renders in historical buildings*. International Journal of Architectural Heritage 4, 177-195.
- VELOSA, A. (2006) – *Argamassas de cal com pozolanas para revestimento de paredes antigas*. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Universidade de Aveiro.
- VELOSA, A.; VEIGA, R. (2005) – *Pozzolanic materials – Evolution of mechanical properties*. International Building Lime Symposium 2005, Orlando, Florida, March 2005.
- VELOSA, A.; ROCHA, F.; VEIGA, R. (2009) – *Influence of chemical and mineralogical composition of metakaolin on mortar characteristics*. Acta Geodyn. Geometer 6, 121-126.

ANEXOS

A.1. Dados climáticos da sala de cura húmida



A.2. Resultados individuais do módulo de elasticidade dinâmico

- Argamassas de cal aérea

Identif. Argamassa		Id. Provete	Massa [g]	Argamassas de cal aérea Ed[Mpa]												Média prov. [Mpa]	Dv. Padrão [Mpa]	Média argamassa [Mpa]	Dv. Padrão [Mpa]
				E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E ₅	E ₆	E ₇	E ₈	E ₉	E ₁₀	E ₁₁	E ₁₂				
CL.3	T1	T1-1	442,037	2859	2854	2985	3081	2990	3050	3096	11080	11123	12421	12324		2988	99,0	3092,3	182
		T1-2	438,408	3096	3071	3264	3255	3507	12128	12186	12164	12128				3239	174,2		
CL.3_Mk30	T2	T2-1	437,813	2250	2213	2216	4592	6003	4552	4551	4551	6971				2226	20,6	2274,8	49
		T2-2	439,035	2319	2358	2316	2331	4891	4814	4954	4964					2331	19,1		
		T2-3	437,795	2281	2248	2235	2256	4930	4870	4806	4821	581	558	569	608	2255	19,4		
CL.3_Mk30-2	T11	T11-1	450,417	1342	1362	1367	1351	5150	5156	5146	5151	10468	10453	10449	10501	1356	11,2	1360,3	87
		T11-2	456,348	1471	1454	1463	1468	5553	5551	5543	5548	11449	11466	11450	11455	1464	7,4		
		T11-3	458,797	1273	1253	1258	1261	5241	5181	5177	5187					1261	8,5		
CL.3_Mk50	T3	T3-1	437,593	1331	1347	1327	1335	4894	4860	4858	4880	11381	11263	11493	11302	1335	8,6	1362,3	37
		T3-2	438,625	1338	1353	1334	1337	5042	5007	5014	5021	11081	11053	10664	11063	1341	8,5		
		T3-3	438,520	1400	1407	1422	1416	5369	5364	5310	5338	11106	11098	11054	11067	1411	9,7		
CL.3_Mk50-2	T12	T12-1	440,450	2708	2807	2830	2837	4147	5195	5203	5227	10485	10473	10480	10484	2796	59,7	2713,7	75
		T12-2	440,705	2691	2711	2720	2698	10187	10217	10191	10217					2705	13,0		
		T12-3	440,062	2637	2605	2659	2661	9956	9933	10000	9958					2641	26,0		
CL.2	T4	T4-1	447,755	3300	3314	3321	3318	12340	12332	12284	12321					3313	9,3	3290,4	219
		T4-2	443,305	3132	3127	3050	3083	3935	11788	11760	11698	11760				3265	375,8		
		T4-3	450,949	3103	3369	3359	3361	3294	13208	13006	13103	13224				3297	112,7		
CL.2_Mk30	T5	T5-1	444,050	1167	3010	3264	3417	3217	4307	4295	4316	6375	6403	6411	6421	3689	588,9	3604,9	626
		T5-2	442,352	3404	3101	3109	3112	3508	3510	6338	6288	6321	6353			3291	204,5		
		T5-3	441,827	2958	2945	3055	3130	4793	4697	4231	4323	6332	6291			3767	818,1		
CL.2_Mk50	T6	T6-1	439,654	5114	5189	5293	5117	7658	6221	6233	6258					5178	84,0	4899,6	243
		T6-2	438,230	5185	4606	4691	4678	4548	4997	6997	6983	7146	6252			4790	250,4		
		T6-3	436,023	4783	4796	4802	4795	7110	7098	7121	7183					4794	8,0		

xxxx Gama de valores considerados

Identif. Argamassa		Id. Provete	Massa [g]	Argamassas de cal aérea Ed [Mpa]												Média prov. [Mpa]	Dv. Padrão [Mpa]	Média argamassa [Mpa]	Dv. Padrão [Mpa]
				E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E ₅	E ₆	E ₇	E ₈	E ₉	E ₁₀	E ₁₁	E ₁₂				
CL.1	T7	T7-1	454,766	1851	1671	1783	1661	11272	2956	3333	3466	3081				3209	232,2	3487,6	253
		T7-2	461,546					3518	3614	3584	3601					3579	42,6		
		T7-3	455,750	1127	1208	1173	1196	3839	3527	3618	3714					3675	133,6		
CL.1_Mk30	T8	T8-1	448,020	8053	8107	8114	8117	11783	11821	11803	12099					8098	30,1	8244,9	168
		T8-2	447,395	8106	8184	8198	8204	13870	12931	12931	12938					8173	45,4		
		T8-3	447,973	8437	8461	8456	8502	15961	15637	14306	14295					8464	27,4		
CL.1-2	T13	T13-1	450,769	3626	3638	3900	3863									3757	144,9	3650,3	110
		T13-2	434,688	3638	3587	3615	3598									3610	22,2		
		T13-3	434,978	3586	3592	3578	3583									3585	5,9		
CL.1_Mk30-2	T14	T14-1	438,978	6547	6515	6519	6607	17442	17506	15491	17519					6547	42,5	6630,5	104
		T14-2	444,176	6586	6586	6589	6554	9016	7333	7298	8131					6579	16,6		
		T14-3	439,997	6773	6760	6763	6767	11232	11344	11238	11322					6766	5,6		
CL.1_Mk50	T9	T9-1	440,539	3881	3953	3898	3936	11651	11670	10981	11593					3917	33,2	4662,0	592
		T9-2	446,360	5041	5036	5025	11781	11739	11703	11746						5034	8,2		
		T9-3	443,165	5128	5131	5117	5136	7671	8818	6422	13108	12451	12894	13138		5128	8,0		

xxxx Gama de valores considerados

- Argamassas de cal hidráulica natural

Identif. Argamassa		Id. Provete	Massa [g]	Argamassas de cal hidráulica natural Ed [Mpa]												Média prov. [Mpa]	Dv. Padrão [Mpa]	Média argamassa [Mpa]	Dv. Padrão [Mpa]
				E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E ₅	E ₆	E ₇	E ₈	E ₉	E ₁₀	E ₁₁	E ₁₂				
Lm_Hc	J1	J1-1	482,731	2888	2907	3023	3046	3623	3701	3683	3596	11371	11382	11319	11328	2966	80	2969	285
		J1-2	480,635	2102	2098	2086	2105	3100	3096	3114	3098					3102	8		
		J1-3	479,810	2934	2941	2926	2937	3680	3667	3678	3685					2935	6		
	J9	J9-1	474,125	2502	2624	2553	2661	2956	9533	9517	9716	9485				2659	177		
		J9-2	481,514	2782	2733	2747	2751	10679	10717	10702	10689					2753	21		
		J9-3	481,438	3560	3562	3388	3397									3477	97		
Sm_Sc	J2	J2-1	470,855	1586	1559	1577	1557									1570	14	1655	95
		J2-2	470,563	1670	1668	1786	1660									1696	60		
		J2-3	470,436	1858	1857	1703	1718									1784	85		
	J10	J10-1	469,190	1708	1679	1680	1710									1694	17		
		J10-2	478,915	1746	1543	1527	1521									1584	108		
		J10-3	476,866	1597	1595	1615	1608									1604	9		
Sm_Hc	J3	J3-1	475,455	2767	2771	2858	2862	4348	4370	4386	4401	6741	6736	6724	6793	2815	53	2361	486
		J3-2	483,500	1915	1892	1907	1913	4062	3277	3703	3838					1907	10		
		J3-3	485,584	4046	4043	3919	3912	5573	6919	5811	6169					3980	75		
Sm_Hc_10Mk	J4	J4-1	470,205	2172	2178	2171	1243	4132	8300	8287	8290	8266				1941	465	2373	437
		J4-2	474,085	2769	2772	2739	2867	3846	3971	4219	4177	9646	9918	9597	9652	2787	56		
		J4-3	472,598	2459	2425	2337	2339	4231	4217	4833	4791	9055	9067	9064	9072	2390	62		
Sm_Sc_10Mk	J5	J5-1	465,878	1506	1502	1562	1563									1533	34	1508	37
		J5-2	475,090	1531	1533	1519	1495									1520	17		
		J5-3	473,862	1488	1437	1480	1476									1470	23		
Lm_Hc_5Mk	J6	J6-1	481,473	3562	3632	3574	3659	6775	6782	6768	6803					3607	46	3708	153
		J6-2	478,265	3931	3930	3867	3914	6819	6726	6820	6828					3911	30		
		J6-3	496,530	3601	3584	3621	3618	6883	6849	6902	6857					3606	17		
Lm_Hc_10Mk	J7	J7-1	472,920	2688	2669	2669	2613	9960	10122	9987	9966					2660	32	2602	64
		J7-2	461,448	2630	2628	2642	2595	9649	9709	9621	9675					2624	20		
		J7-3	464,593	2516	2520	2529	2527	9597	9581	9592	9587					2523	6		
Lm_Hc_20Mk	J8	J8-1	472,150	3173	3084	3252	3219	6715								3182	73	3106	156
		J8-2	471,750	3220	3231	3248	3226									3231	12		
		J8-3	467,138	2908	2917	2889	2901	3395	3378	3062	3056					2904	12		

xxxx Gama de valores considerados

A.3. Resultados individuais da resistência à tracção e à compressão

- Argamassas de cal aérea

Identif. Argamassa		Id. Provete	Ft [N]	Rt provete [MPa]	Rt arg [MPa]	Dv. Padrão [MPa]	Fc [N]	Rc provete [MPa]	Rc arg [MPa]	Dv. Padrão [MPa]
CL.3	T1	T1-1	98	0,23	0,24	0,02	609	0,38	0,37	0,02
		T1-2	111	0,26			569	0,36		
CL.3-2	T10	T10-1	-	-	-	-	773	0,48	0,48	0,00
		T10-2	-	-			768	0,48		
		T10-3	-	-			-	-		
CL.3_Mk30	T2	T2-1	23	0,05	0,06	0,01	430	0,27	0,30	0,03
		T2-2	25	0,06			510	0,32		
		T2-3	29	0,07			496	0,31		
CL.3_Mk30-2	T11	T11-1	86	0,20	0,17	0,03	840	0,52	0,53	0,04
		T11-2	72	0,17			918	0,57		
		T11-3	62	0,14			799	0,50		
CL.3_Mk50	T3	T3-1	87	0,20	0,20	0,01	859	0,54	0,56	0,02
		T3-2	83	0,19			913	0,57		
		T3-3	89	0,21			912	0,57		
CL.3_Mk50-2	T12	T12-1	228	0,53	0,48	0,05	2645	1,65	1,52	0,12
		T12-2	201	0,47			2351	1,47		
		T12-3	187	0,44			2294	1,43		
CL.2	T4	T4-1	111	0,26	0,30	0,04	688	0,43	0,48	0,05
		T4-2	142	0,33			857	0,54		
		T4-3	126	0,30			741	0,46		
CL.2_Mk30	T5	T5-1	203	0,48	0,48	0,01	2033	1,27	1,41	0,13
		T5-2	209	0,49			2455	1,53		
		T5-3	200	0,47			2264	1,42		
CL.2_Mk50	T6	T6-1	241	0,57	1,24	0,08	5101	3,19	3,13	0,10
		T6-2	553	1,30			4833	3,02		
		T6-3	503	1,18			5092	3,18		
CL.1	T7	T7-1	55	0,13	0,49	0,01	1160	0,73	1,08	0,06
		T7-2	207	0,48			1663	1,04		
		T7-3	215	0,50			1800	1,13		
CL.1-2	T13	T13-1	276	0,65	0,58	0,08	1628	1,02	0,99	0,05
		T13-2	210	0,49			1647	1,03		
		T13-3	258	0,60			1501	0,94		
CL.1_Mk30	T8	T8-1	719	1,68	1,69	0,05	9768	6,11	6,32	0,37
		T8-2	741	1,74			9762	6,10		
		T8-3	697	1,63			10800	6,75		
CL.1_Mk30-2	T14	T14-1	702	1,65	1,58	0,09	9882	6,18	6,09	0,18
		T14-2	484	1,13			9954	6,22		
		T14-3	645	1,51			9415	5,88		
CL.1_Mk50	T9	T9-1	470	1,10	1,07	0,05	9983	6,24	6,27	0,07
		T9-2	441	1,03			9955	6,22		
		T9-3	625	1,47			10152	6,35		

xxx

Valores desprezados

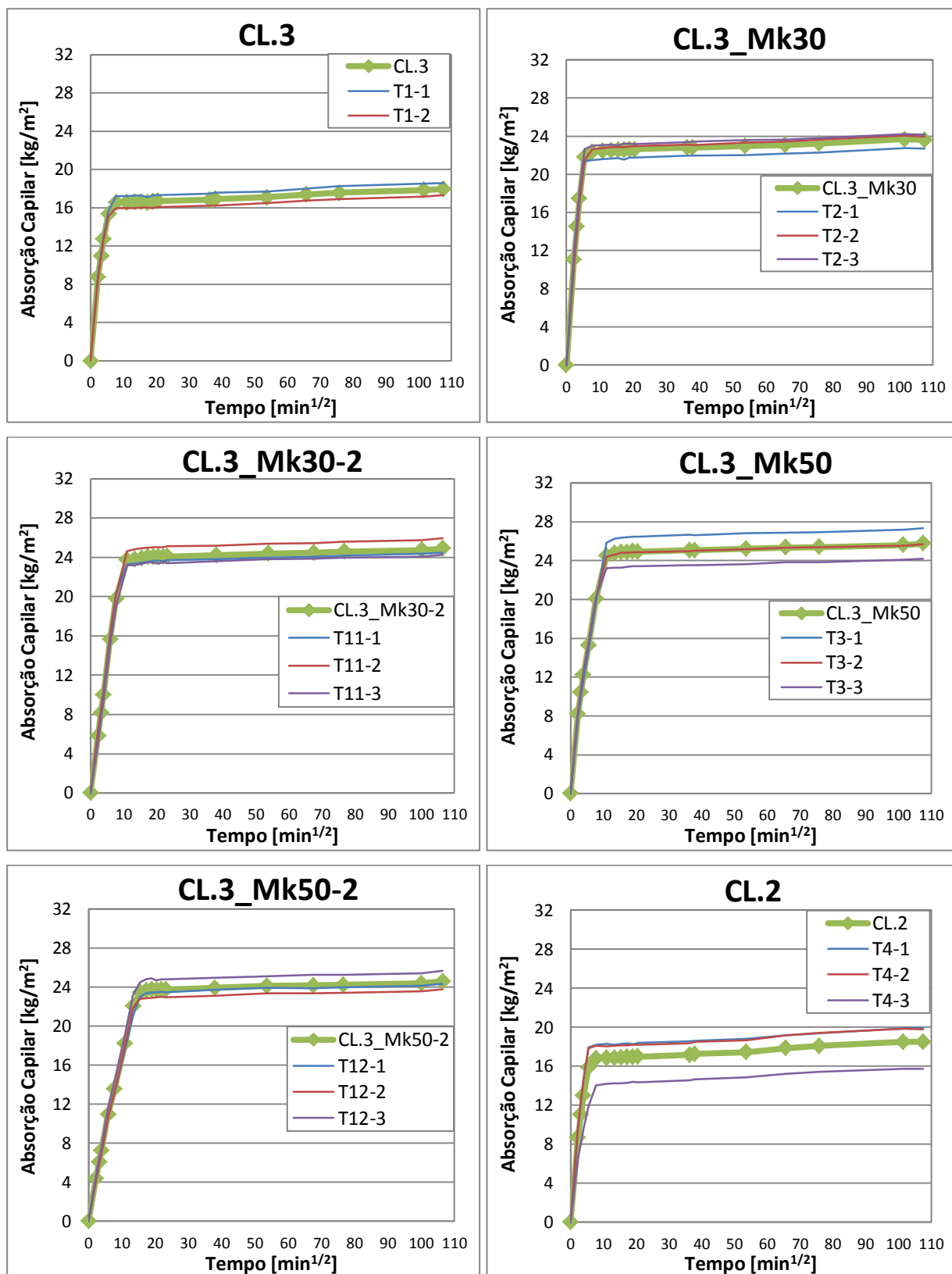
- Argamassas de cal hidráulica natural

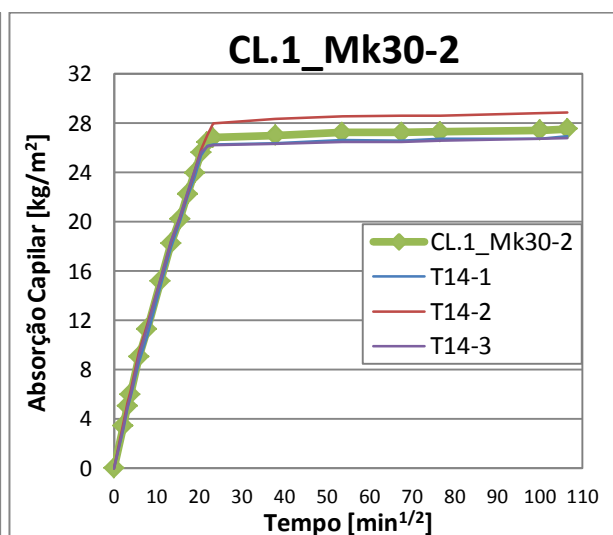
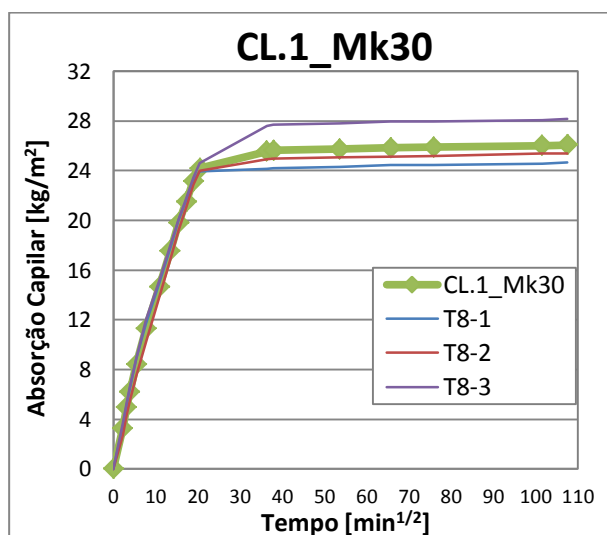
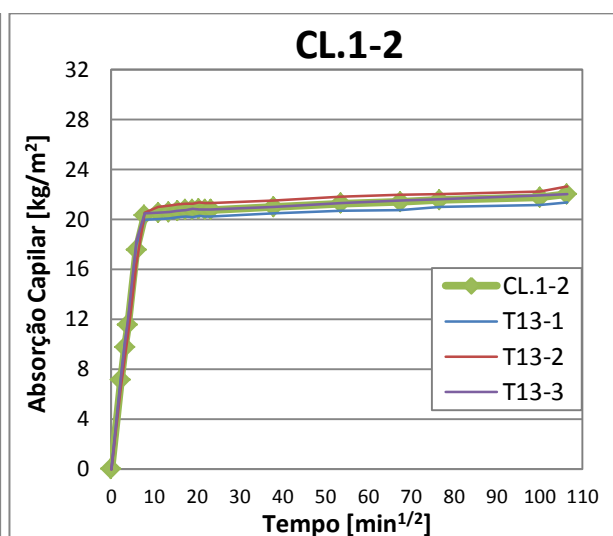
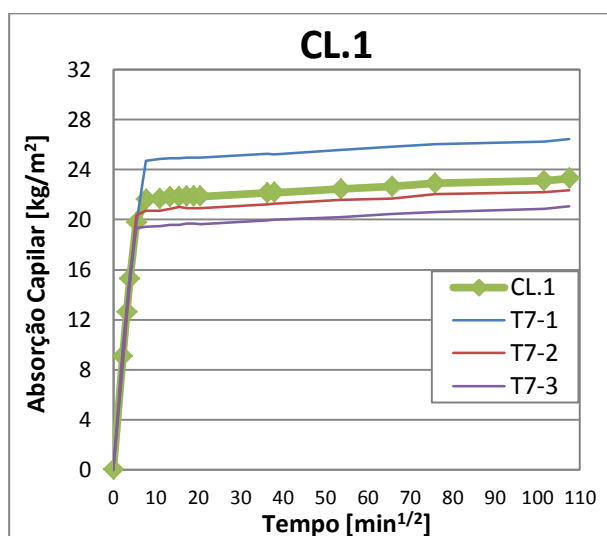
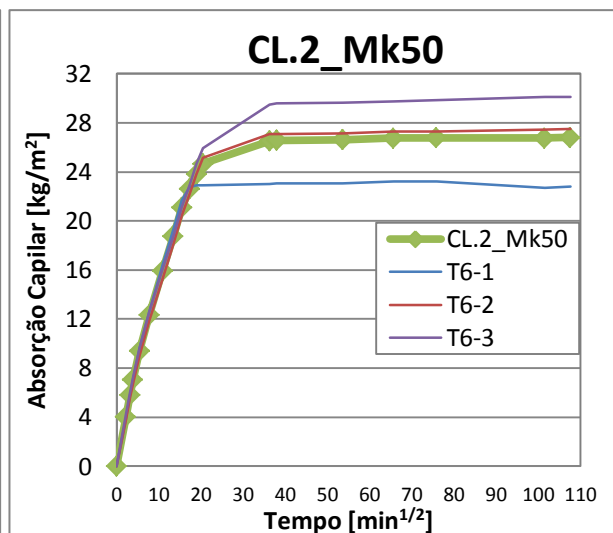
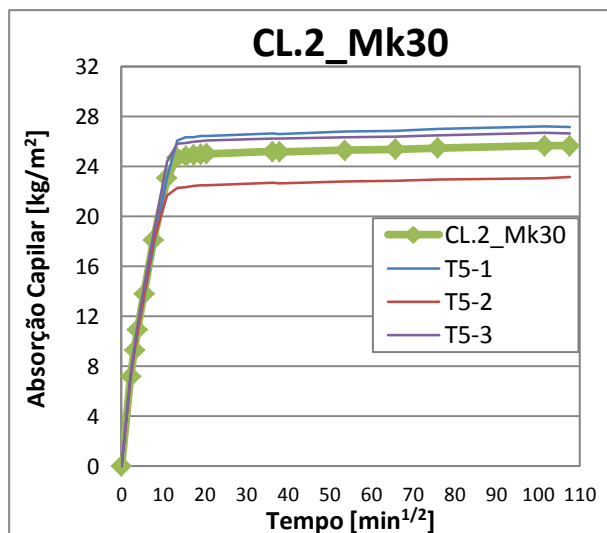
Identif. Argamassa		Id. Provete	Ft [N]	Rt _{provete} [MPa]	Rt _{arg} [MPa]	Dv. Padrão [MPa]	Fc [N]	R _{c provete} [MPa]	R _{c arg} [MPa]	Dv. Padrão [MPa]
NHL.3_Lm_Hc	J1	J1-1	130	0,30	0,36	0,06	1461	0,91	0,90	0,11
		J1-2	168	0,39			1407	0,88		
		J1-3	139	0,33			1490	0,93		
	J9	J9-1	135	0,32			1148	0,72		
		J9-2	160	0,37			1427	0,89		
		J9-3	194	0,45			1711	1,07		
NHL.3_Sm_Sc	J2	J2-1	67	0,16	0,17	0,02	523	0,33	0,35	0,02
		J2-2	81	0,19			588	0,37		
		J2-3	77	0,18			555	0,35		
	J10	J10-1	73	0,17			592	0,37		
		J10-2	65	0,15			521	0,33		
		J10-3	62	0,15			583	0,36		
NHL.3_Sm_Hc	J3	J3-1	137	0,32	0,39	0,08	1634	1,02	1,09	0,22
		J3-2	165	0,39			1457	0,91		
		J3-3	202	0,47			2126	1,33		
NHL.3_Sm_Hc_10Mk	J4	J4-1	133	0,31	0,36	0,05	2251	1,41	1,45	0,04
		J4-2	174	0,41			2297	1,44		
		J4-3	148	0,35			2389	1,49		
NHL.3_Sm_Sc_10Mk	J5	J5-1	83	0,19	0,19	0,01	1962	1,23	1,07	0,14
		J5-2	79	0,19			1663	1,04		
		J5-3	84	0,20			1509	0,94		
NHL.3_Lm_Hc_5Mk	J6	J6-1	165	0,39	0,44	0,06	3030	1,89	1,83	0,09
		J6-2	216	0,51			2770	1,73		
		J6-3	184	0,43			3001	1,88		
NHL.3_Lm_Hc_10Mk	J7	J7-1	172	0,40	0,36	0,05	2427	1,52	1,57	0,14
		J7-2	150	0,35			2764	1,73		
		J7-3	132	0,31			2335	1,46		
NHL.3_Lm_Hc_20Mk	J8	J8-1	222	0,52	0,48	0,04	2941	1,84	1,82	0,06
		J8-2	201	0,47			2984	1,87		
		J8-3	185	0,43			2797	1,75		

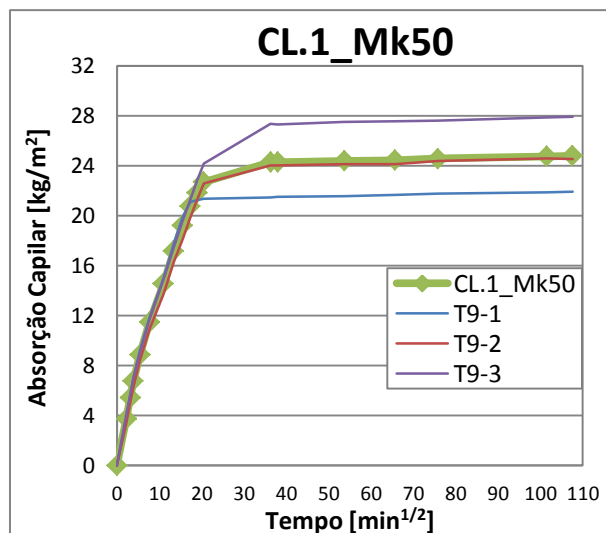
xxx Valores desprezados

A.4. Resultados individuais de absorção de água por capilaridade

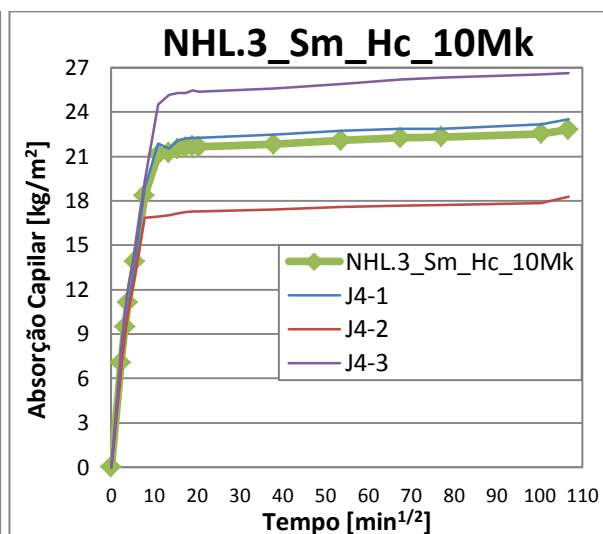
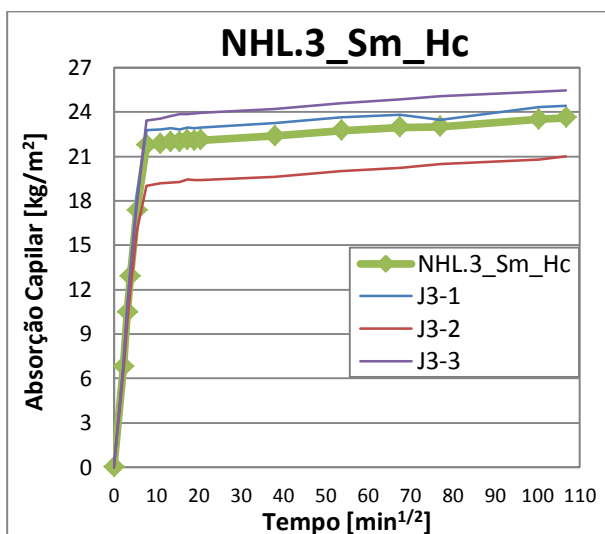
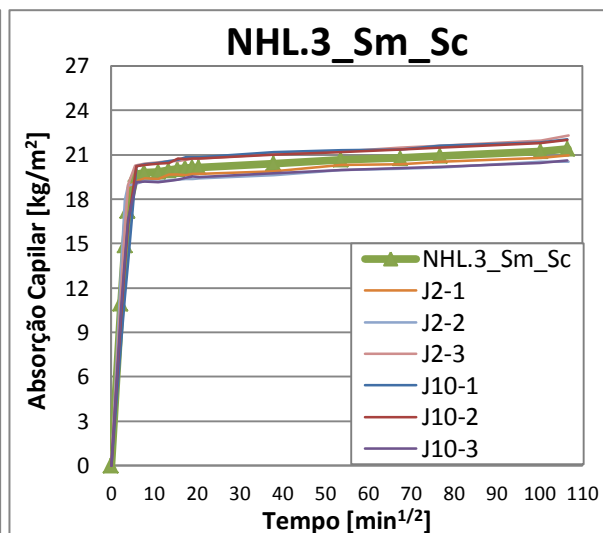
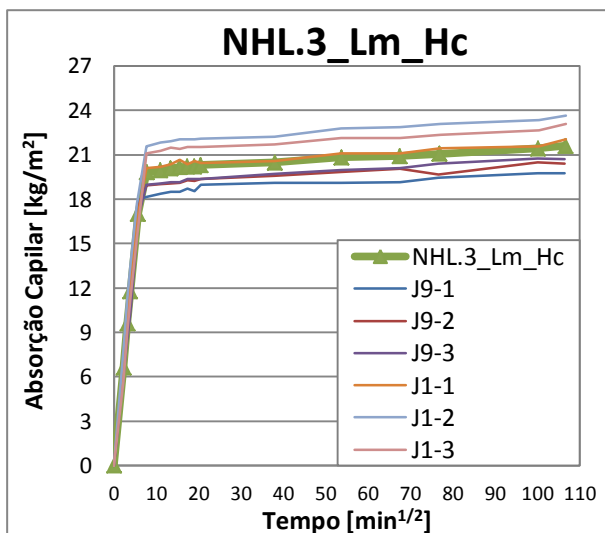
- Argamassas de cal aérea

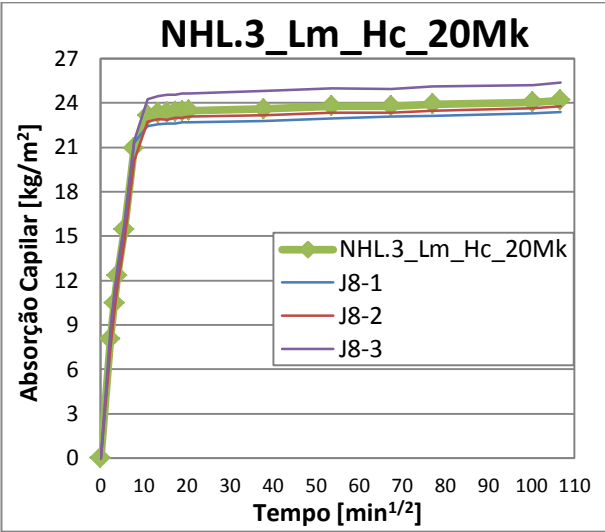
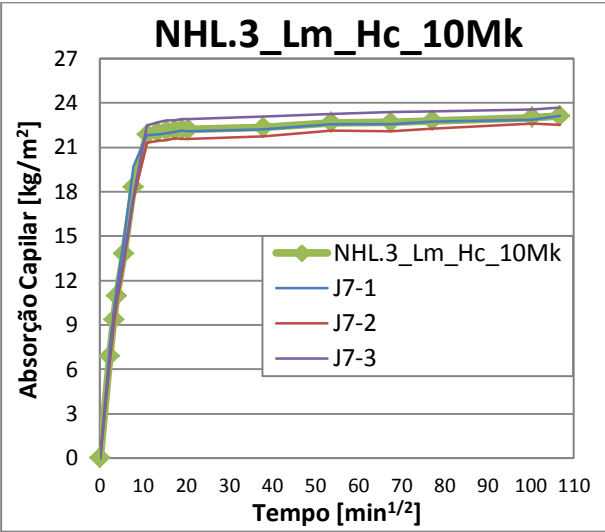
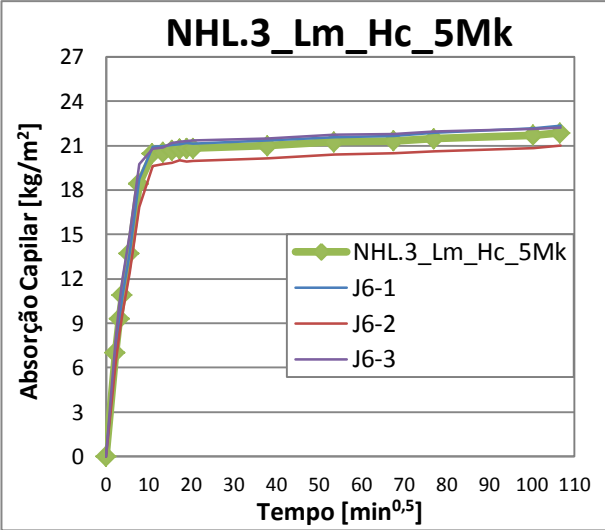
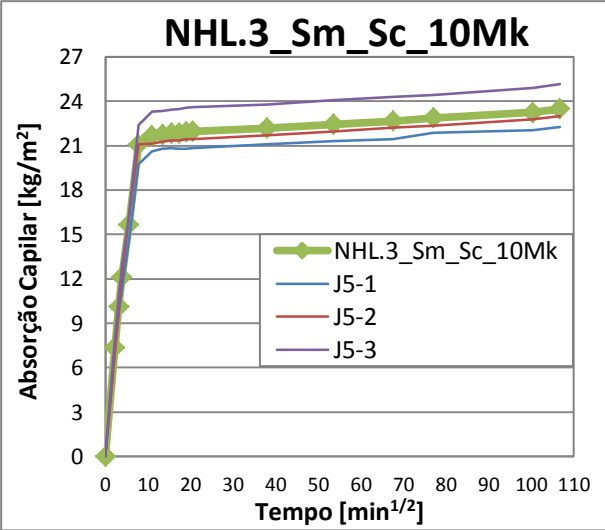






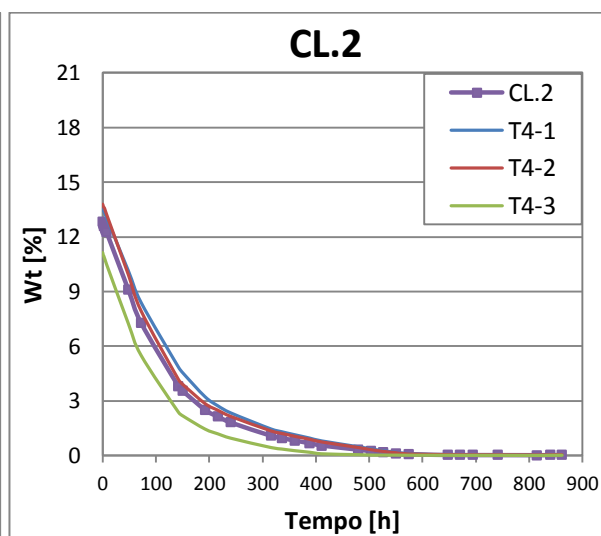
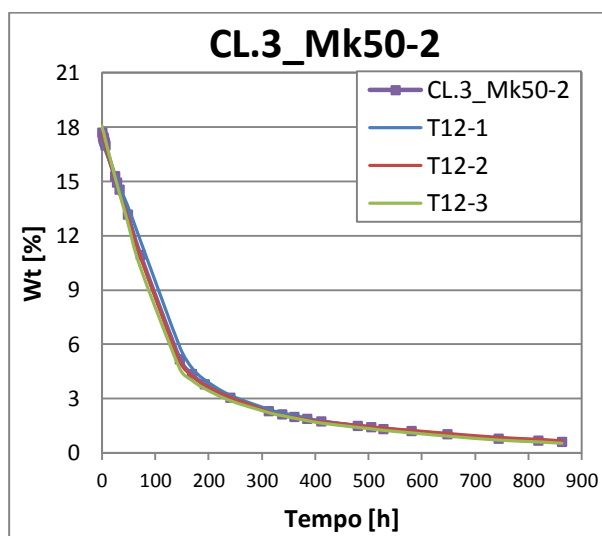
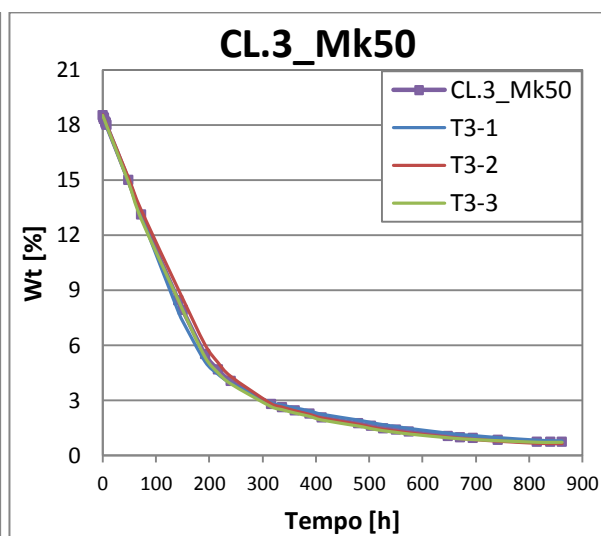
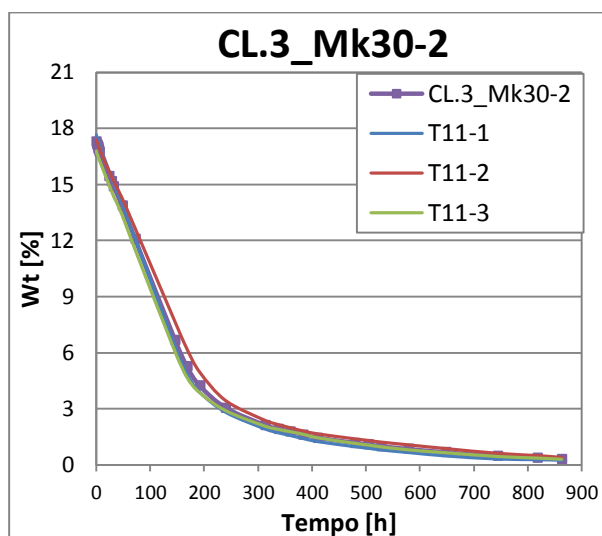
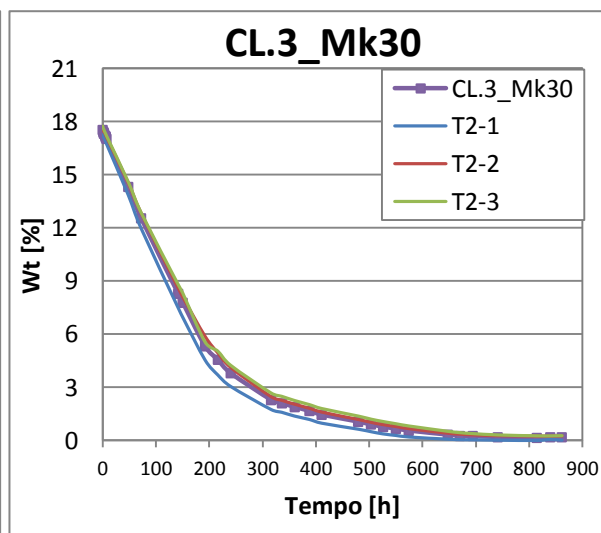
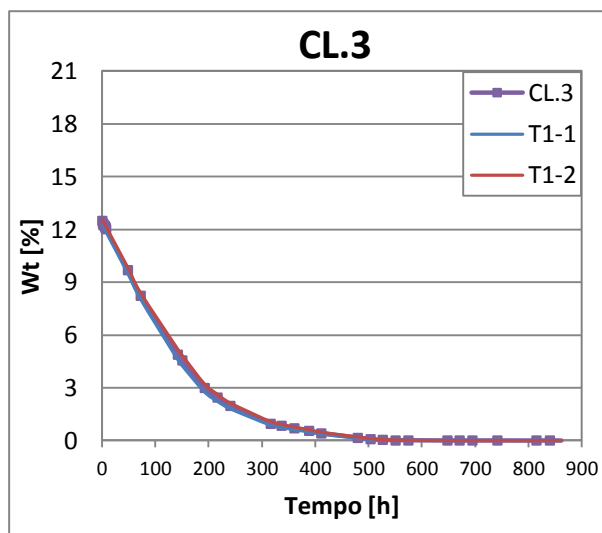
- Argamassas de cal hidráulica natural

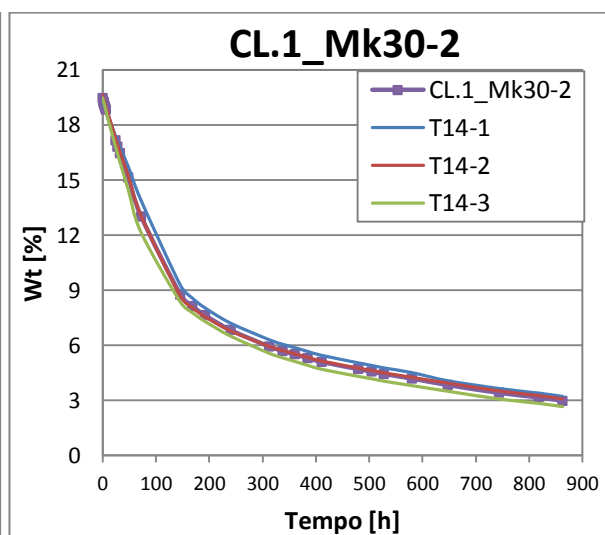
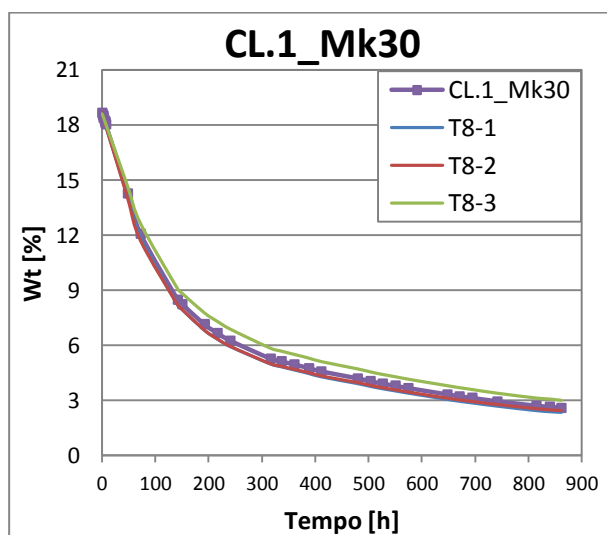
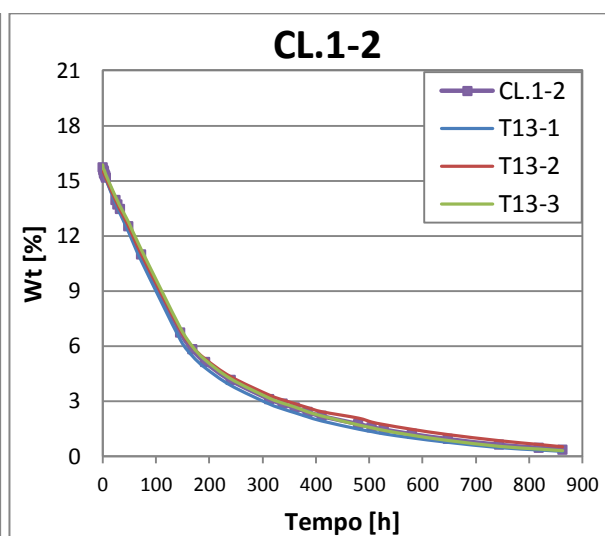
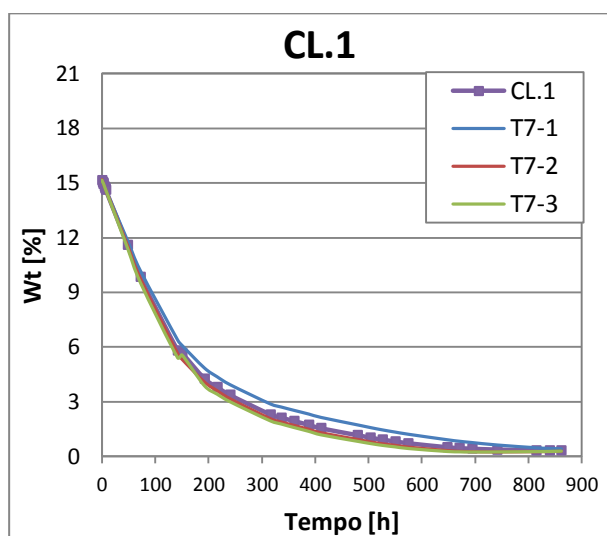
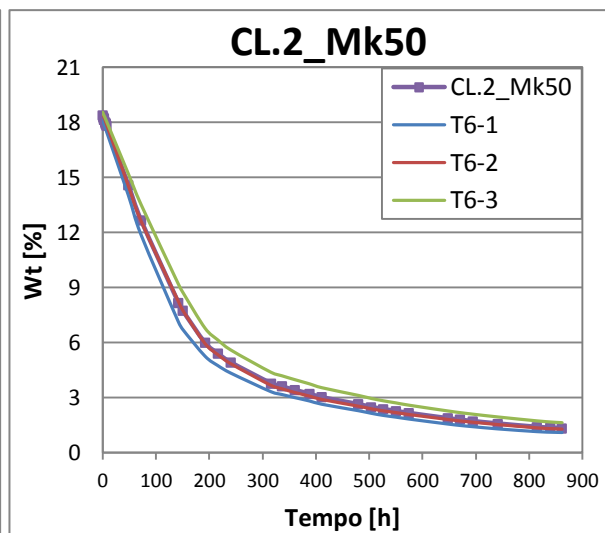
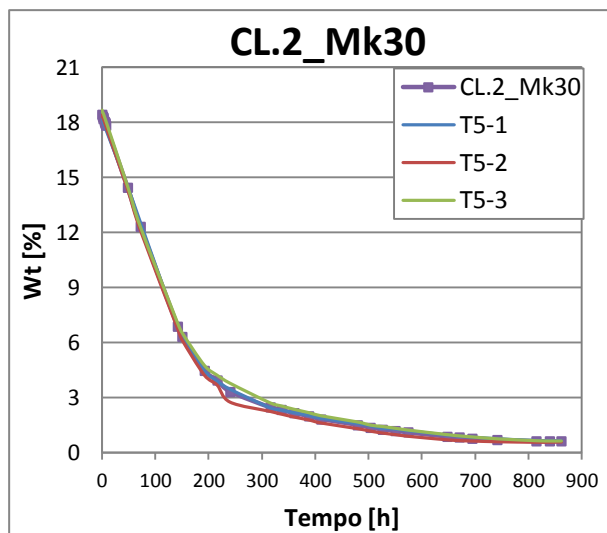


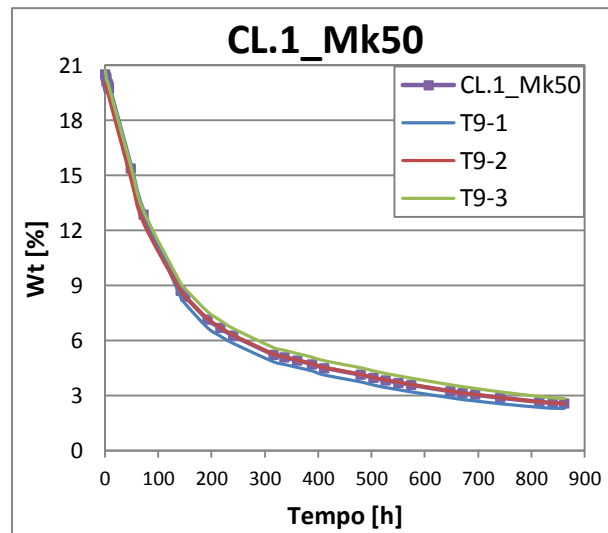


A.5. Resultados individuais de secagem

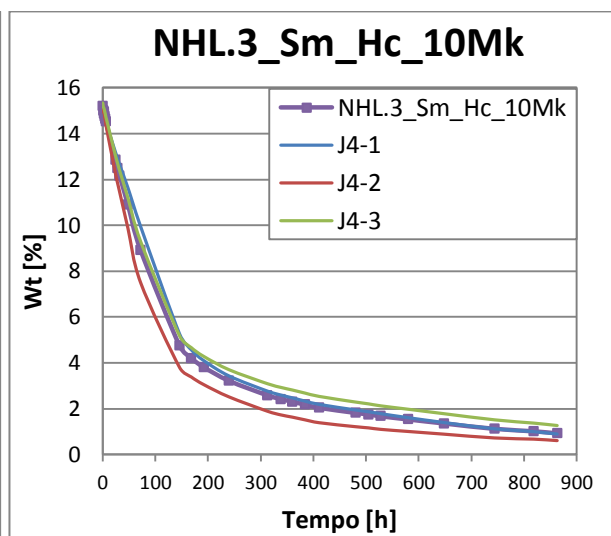
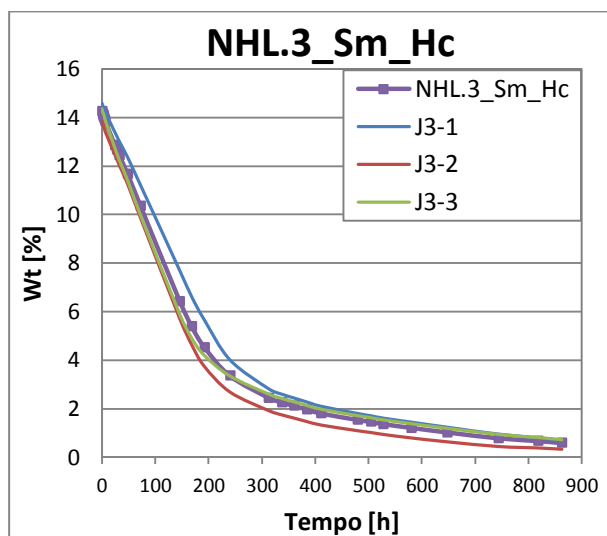
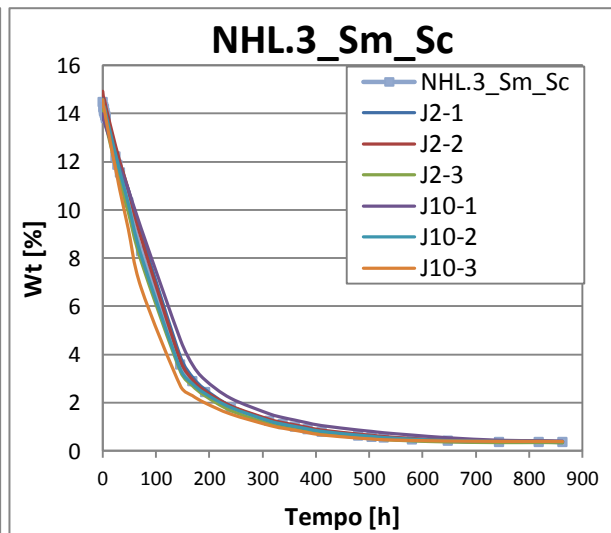
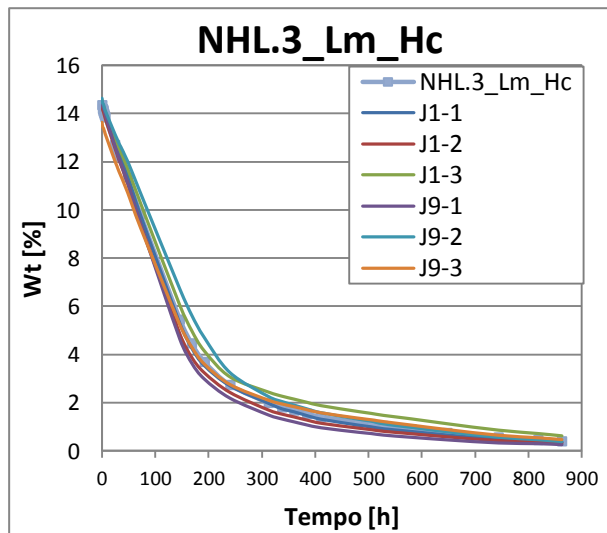
- Argamassas de cal aérea

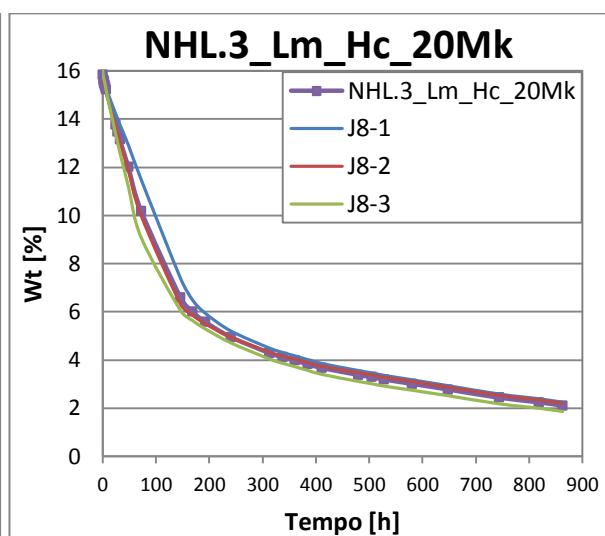
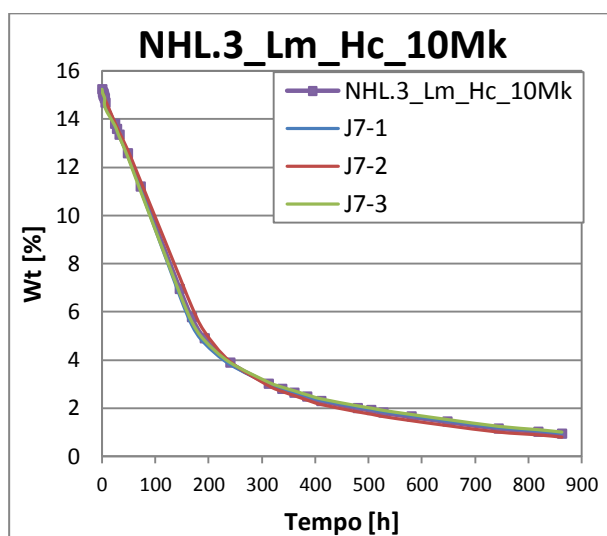
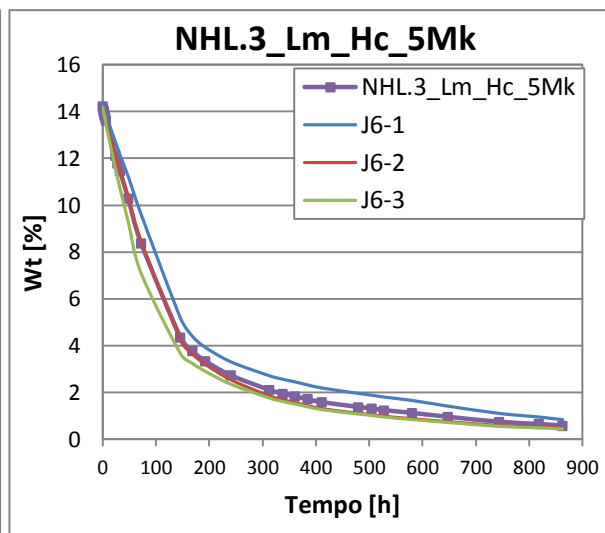
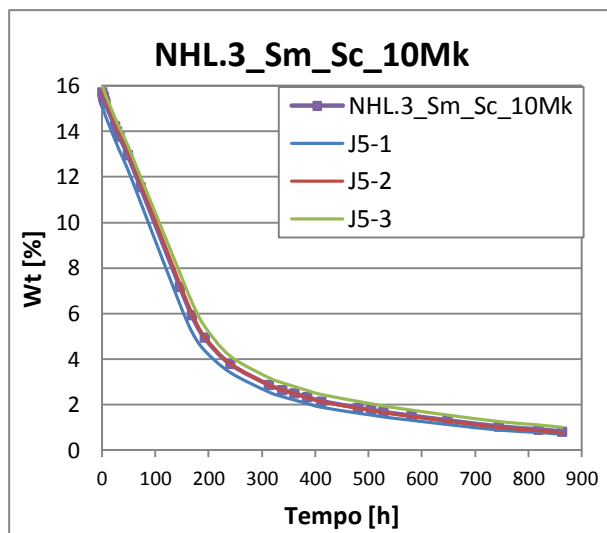






- Argamassas de cal hidráulica natural





A.6. Resultados individuais de porosidade aberta e massa volúmica aparente

- Argamassas de cal aérea

Identif. Argamassa		Id. Provete	Massa				Pab prov	Pab arg	DP	MVap prov.	MVap arg	DP
			[g]									
			M ₀	M ₁	M ₂	M ₃						
CL.3	T1	T1-1	51,193	51,424	28,094	58,895	24,3	25	0,4	1669,6	1680	15
		T1-2	54,554	54,901	30,487	62,963	24,8			1690,5		
CL.3-2	T10	T10-1	65,825	66,143	36,522	75,188	23,4	24	1,1	1710,6	1687	33
		T10-2	59,213	59,507	32,681	68,441	25,0			1664,1		
CL.3_Mk30	T2	T2-1	78,984	79,075	45,583	93,750	30,5	32	1,5	1641,7	1612	25
		T2-2	60,498	60,807	35,276	73,318	32,9			1598,4		
		T2-3	49,929	50,336	29,275	60,793	33,2			1597,1		
CL.3_Mk30-2	T11	T11-1	51,386	51,660	30,421	61,704	32,1	32	0,4	1651,4	1667	15
		T11-2	52,323	52,619	31,225	62,774	32,2			1667,9		
		T11-3	56,996	57,060	33,771	67,720	31,4			1680,8		
CL.3_Mk50	T3	T3-1	47,853	48,178	28,265	58,131	33,3	33	0,7	1613,1	1620	13
		T3-2	62,454	62,989	36,464	75,551	32,1			1611,5		
		T3-3	64,498	64,909	37,920	77,633	32,0			1634,5		
CL.3_Mk50-2	T12	T12-1	65,073	65,553	37,630	77,922	30,7	31	0,7	1626,9	1630	13
		T12-2	54,554	54,994	31,866	65,844	31,9			1618,5		
		T12-3	58,641	59,018	34,218	70,111	30,9			1644,3		
CL.2	T4	T4-1	59,020	59,382	33,719	68,402	26,0	25	1,6	1712,1	1705	9
		T4-2	60,533	60,828	34,673	70,275	26,5			1708,6		
		T4-3	66,383	66,856	36,695	76,142	23,5			1694,8		
CL.2_Mk30	T5	T5-1	54,823	55,289	32,382	65,976	31,8	33	1,6	1645,8	1621	39
		T5-2	76,266	76,599	44,648	91,299	31,5			1642,0		
		T5-3	48,429	48,856	28,544	59,531	34,4			1576,7		
CL.2_Mk50	T6	T6-1	69,704	70,111	40,249	83,223	30,5	32	1,3	1631,5	1596	31
		T6-2	46,286	46,687	26,434	56,136	31,8			1571,8		
		T6-3	37,907	38,318	22,148	46,335	33,1			1584,2		
CL.1	T7	T7-1	79,024	79,374	46,627	93,059	29,5	30	0,5	1709,5	1701	10
		T7-2	52,362	52,655	31,090	62,016	30,3			1702,6		
		T7-3	61,137	61,417	36,150	72,499	30,5			1689,6		
CL.1-2	T13	T13-1	56,656	57,007	33,532	66,747	29,3	31	1,3	1716,3	1684	28
		T13-2	53,361	53,740	31,724	64,059	31,9			1662,0		
		T13-3	51,029	51,362	30,155	60,819	30,8			1675,0		
CL.1_Mk30	T8	T8-1	65,228	65,699	37,857	78,884	32,1	32	0,2	1601,4	1606	4
		T8-2	60,496	60,941	35,289	73,180	32,3			1608,3		
		T8-3	55,459	55,890	32,453	67,226	32,6			1607,3		
CL.1_Mk30-2	T14	T14-1	56,048	56,477	33,006	68,240	33,4	34	0,9	1602,9	1585	17
		T14-2	47,681	48,080	27,987	58,640	34,5			1568,5		
		T14-3	59,858	60,308	35,608	73,680	35,1			1584,1		
CL.1_Mk50	T9	T9-1	77,459	77,969	45,605	94,529	33,8	34	0,6	1593,7	1593	7
		T9-2	68,648	69,136	40,484	83,687	33,7			1600,3		
		T9-3	54,792	55,235	32,520	67,356	34,8			1585,6		

- Argamassas de calhidráulica natural

Identif. Argamassa		Id. Prov.	Massa				Pab prov	Pab arg	DP	MVap prov.	MVap arg	DP
			[g]									
			M ₀	M ₁	M ₂	M ₃	[%]	[%]	[%]	[kg/m³]	[kg/m³]	[kg/m³]
NHL.3_Lm_Hc	J1	J1-1	69,827	70,124	42,507	80,912	24,3	28	3,9	1825,9	1822	20
		J1-2	58,481	58,836	35,712	67,904	24,8			1827,7		
		J1-3	61,375	61,704	37,522	71,568	23,4			1812,4		
	J9	J9-1	69,301	69,523	41,433	80,588	33,1			1775,6	1807	
		J9-2	71,218	71,476	43,230	82,510	29,5			1819,7		
		J9-3	71,256	71,479	43,146	82,317	30,3			1824,8		
NHL.3_Sm_Sc	J2	J2-1	62,993	63,289	38,050	73,372	25,0	30	2,8	1791,8	1800	17
		J2-2	56,312	56,501	34,213	65,359	30,5			1814,1		
		J2-3	57,942	57,890	34,792	67,064	32,9			1793,8		
	J10	J10-1	62,344	62,434	37,483	71,719	30,5			1823,6	1808	
		J10-2	54,996	54,995	33,313	64,171	29,3			1782,2		
		J10-3	67,729	67,741	41,013	78,286	31,9			1817,4		
NHL.3_Sm_Hc	J3	J3-1	44,366	44,680	26,669	51,905	33,2	32	0,6	1770,5	1789	31
		J3-2	48,219	48,463	28,902	55,462	32,1			1824,7		
		J3-3	49,744	50,063	30,326	58,596	32,2			1770,9		
NHL.3_Sm_Hc_10Mk	J4	J4-1	62,709	63,004	37,852	73,574	31,4	32	1,0	1763,7	1771	13
		J4-2	85,398	85,555	51,315	99,222	33,3			1785,9		
		J4-3	43,749	44,095	26,498	51,510	32,1			1763,0		
NHL.3_Sm_Sc_10Mk	J5	J5-1	61,716	61,898	37,418	71,587	32,0	32	0,7	1811,5	1801	9
		J5-2	80,923	81,189	48,866	94,027	30,7			1797,8		
		J5-3	68,161	68,442	41,288	79,438	31,9			1794,0		
NHL.3_Lm_Hc_5Mk	J6	J6-1	63,225	63,324	37,960	72,879	30,9	28	2,7	1813,5	1814	1
		J6-2	62,283	62,563	37,635	72,135	26,0			1813,4		
		J6-3	72,650	72,531	43,877	83,840	26,5			1815,0		
NHL.3_Lm_Hc_10Mk	J7	J7-1	66,151	66,377	39,653	77,235	23,5	29	4,7	1766,2	1725	71
		J7-2	59,000	59,311	35,237	71,343	31,8			1642,7		
		J7-3	54,644	54,986	32,722	63,862	31,5			1765,8		
NHL.3_Lm_Hc_20Mk	J8	J8-1	59,584	59,883	35,645	70,113	34,4	32	2,0	1737,4	1732	7
		J8-2	64,522	64,899	38,631	76,283	30,5			1723,7		
		J8-3	58,566	58,917	35,384	69,346	31,8			1734,8		

A.7. Resultados individuais de condutibilidade térmica

- Argamassas de cal aérea

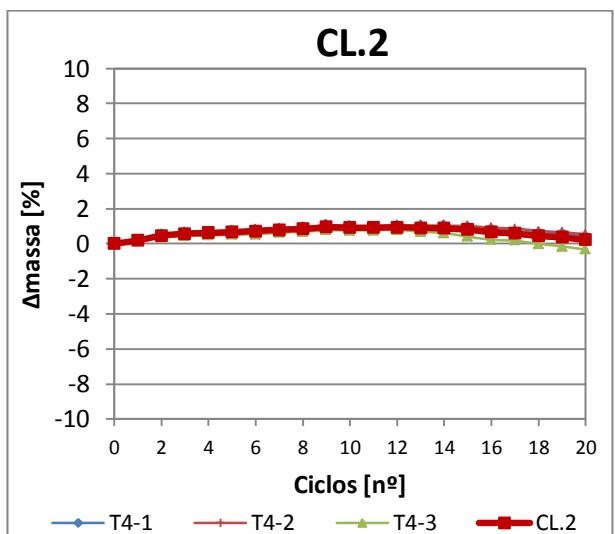
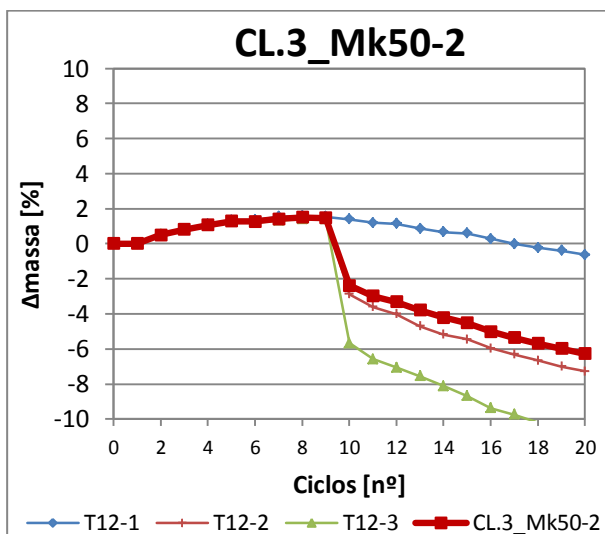
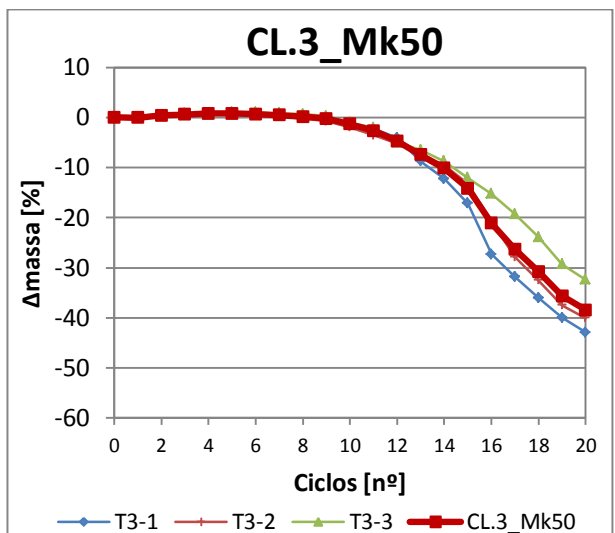
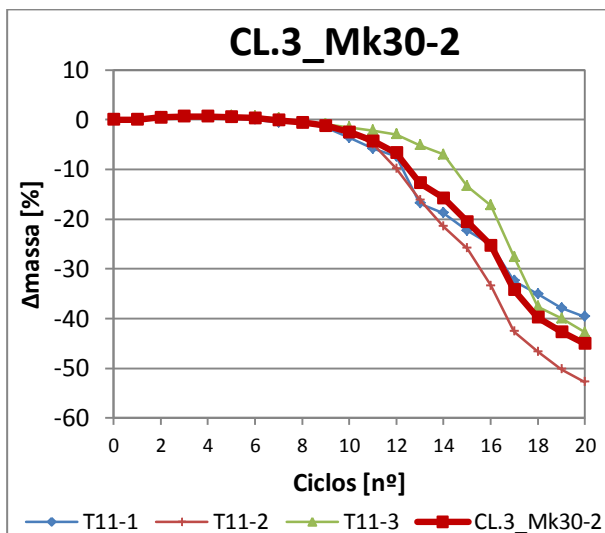
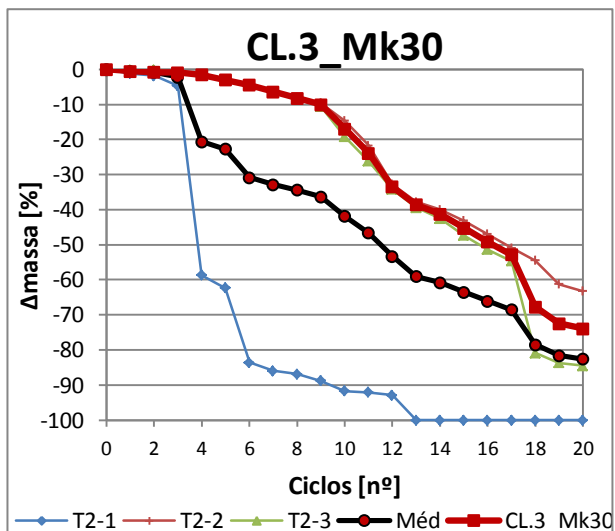
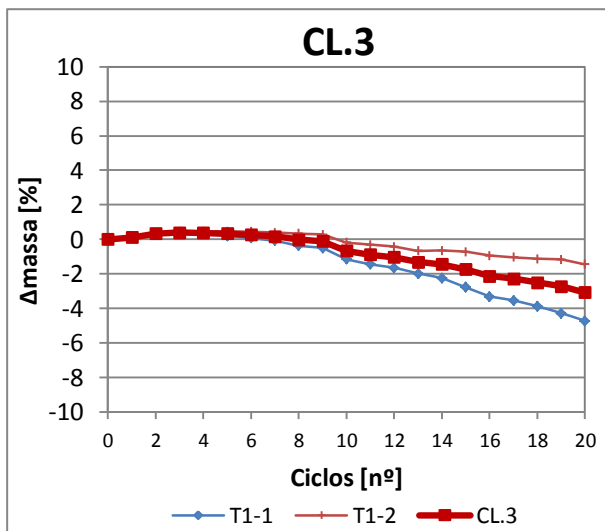
Identif. Argamassa		Id. Provete	λ [W/m.K]			λ_1/λ_2	$\lambda_{provete}$	$\lambda_{argamassa}$	DP
			λ_1	λ_2	λ_3	[%]	[W/m.K]	[W/m.K]	[%]
CL.3	T1	T1-1	0,631	0,639		1,25%	0,635	0,648	0,018
		T1-2	0,677	0,644		4,87%	0,661		
CL.3_Mk30-2	T11	T11-1	0,460	0,481		4,37%	0,471	0,463	0,013
		T11-2	0,444	0,452		1,77%	0,448		
		T11-3	0,477	0,461		3,35%	0,469		
CL.3_Mk50-2	T12	T12-1	0,534	0,527		1,31%	0,531	0,486	0,044
		T12-2	0,401	0,498	0,427	19,48%	0,442		
		T12-3	0,497	0,473		4,83%	0,485		
CL.2	T4	T4-1	0,658	0,635		3,50%	0,647	0,655	0,010
		T4-2	0,671	0,662		1,34%	0,667		
		T4-3	0,659	0,643		2,43%	0,651		
CL.2_Mk30	T5	T5-1	0,586	0,600		2,33%	0,593	0,556	0,032
		T5-2	0,535	0,537		0,37%	0,536		
		T5-3	0,535	0,541		1,11%	0,538		
CL.2_Mk50	T6	T6-1	0,638	0,621		2,66%	0,630	0,659	0,028
		T6-2	0,664	0,659		0,75%	0,662		
		T6-3	0,702	0,667		4,99%	0,685		
CL.1-2	T13	T13-1	0,765	0,607	0,741	20,65%	0,704	0,742	0,033
		T13-2	0,786	0,719	0,764	8,52%	0,756		
		T13-3	0,795	0,729	0,772	8,30%	0,765		
CL.1_Mk30-2	T14	T14-1	0,794	0,734	0,787	7,56%	0,772	0,801	0,055
		T14-2	0,762	0,772		1,30%	0,767		
		T14-3	0,881	0,847		3,86%	0,864		
CL.1_Mk50	T9	T9-1	0,598	0,580		3,01%	0,589	0,603	0,020
		T9-2	0,629	0,621		1,27%	0,625		
		T9-3	0,597	0,591		1,01%	0,594		

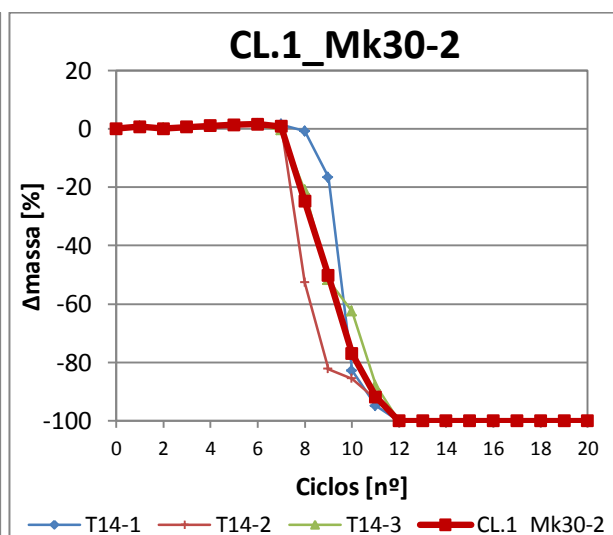
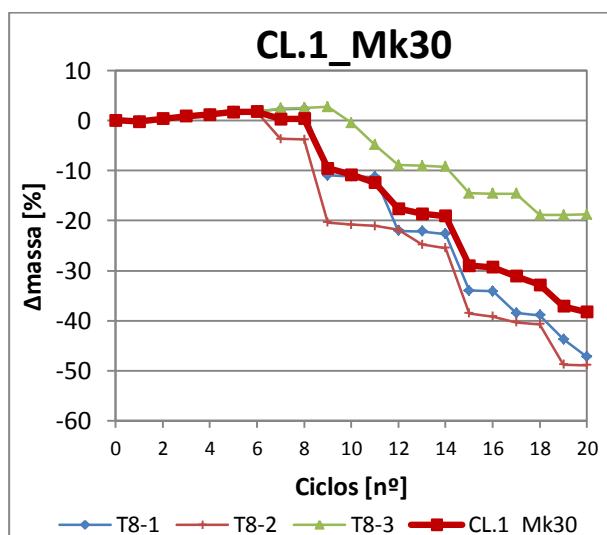
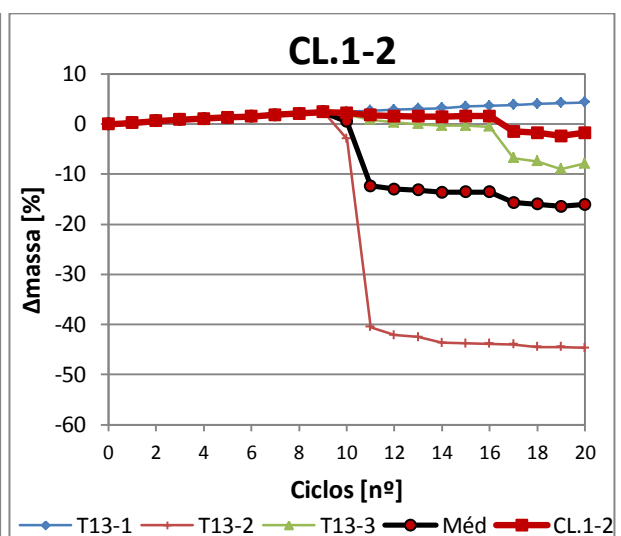
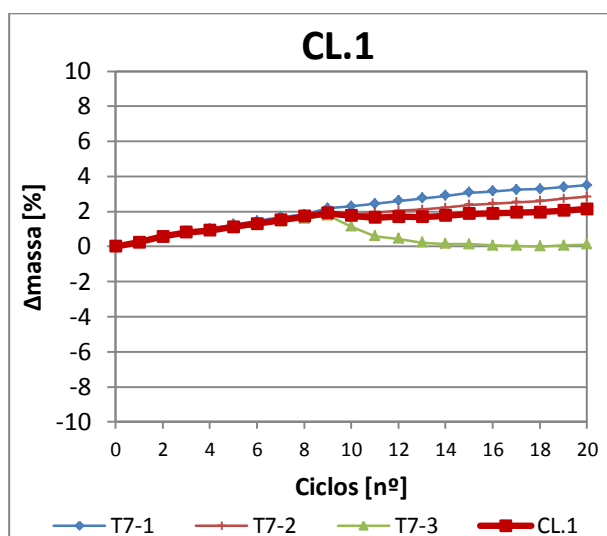
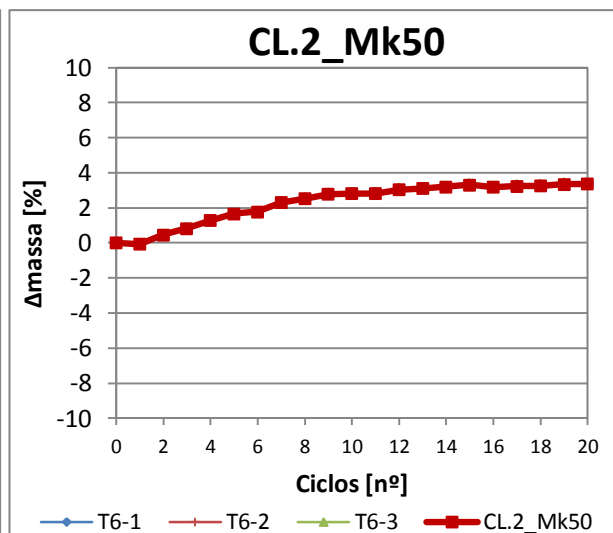
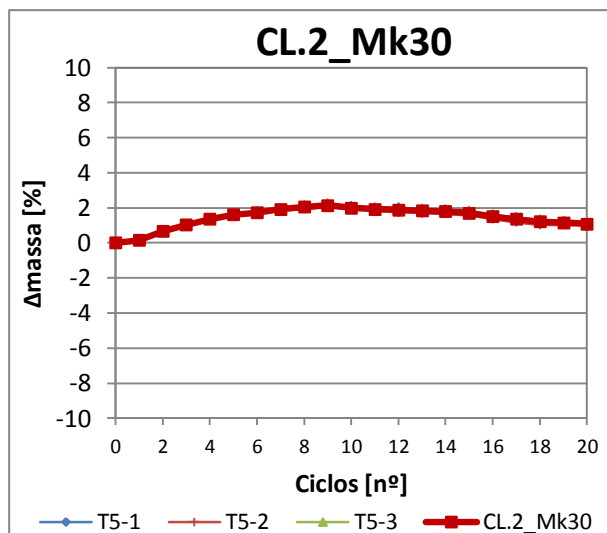
- Argamassas de cal hidráulica natural

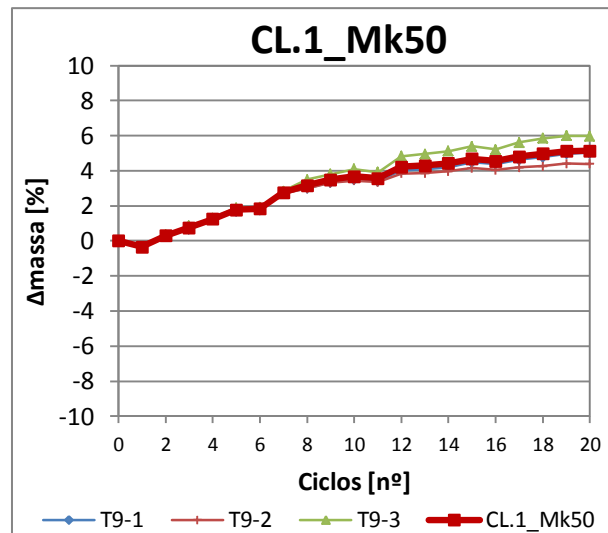
Identif. Argamassa		Id. Provete	λ [W/m.K]			λ_1/λ_2	$\lambda_{provete}$	$\lambda_{argamassa}$	DP
			λ_1	λ_2	λ_3	[%]	[W/m.K]	[W/m.K]	[%]
NHL.3_Lm_Hc	J1	J1-1	0,682	0,723	0,698	5,67%	0,701	0,709	0,016
		J1-2	0,690	0,708		2,54%	0,699		
		J1-3	0,744	0,710		4,57%	0,727		
NHL.3_Sm_Sc	J2	J2-1	0,578	0,602		3,99%	0,590	0,593	0,003
		J2-2	0,605	0,579		4,30%	0,592		
		J2-3	0,582	0,610		4,59%	0,596		
NHL.3_Sm_Hc	J3	J3-1	0,715	0,744		3,90%	0,730	0,741	0,011
		J3-2	0,751	0,732		2,53%	0,742		
		J3-3	0,738	0,763		3,28%	0,751		
NHL.3_Sm_Hc_10Mk	J4	J4-1	0,751	0,764		1,70%	0,758	0,734	0,027
		J4-2	0,706	0,702		0,57%	0,704		
		J4-3	0,744	0,735		1,21%	0,740		
NHL.3_Sm_Sc_10Mk	J5	J5-1	0,623	0,663	0,632	6,03%	0,639	0,633	0,005
		J5-2	0,621	0,641		3,12%	0,631		
		J5-3	0,625	0,635		1,57%	0,630		
NHL.3_Lm_Hc_5Mk	J6	J6-1	0,741	0,747		0,80%	0,744	0,729	0,014
		J6-2	0,726	0,731		0,68%	0,729		
		J6-3	0,719	0,712		0,97%	0,716		
NHL.3_Lm_Hc_10Mk	J7	J7-1	0,641	0,735	0,663	12,79%	0,680	0,684	0,007
		J7-2	0,674	0,685		1,61%	0,680		
		J7-3	0,688	0,697		1,29%	0,693		
NHL.3_Lm_Hc_20Mk	J8	J8-1	0,788	0,827		4,72%	0,808	0,786	0,041
		J8-2	0,826	0,796		3,63%	0,811		
		J8-3	0,730	0,748		2,41%	0,739		

A.8. Resultados individuais de resistência aos sulfatos

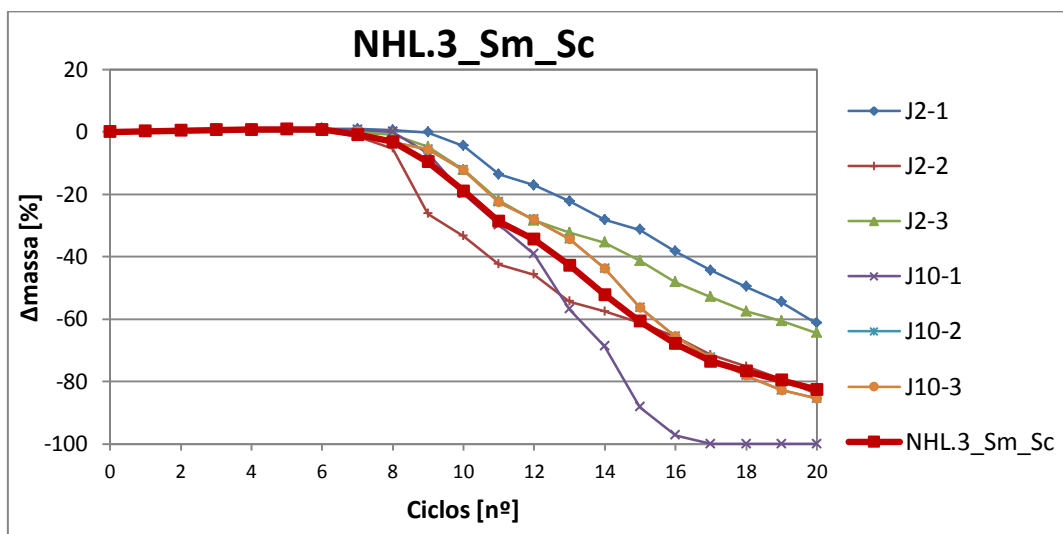
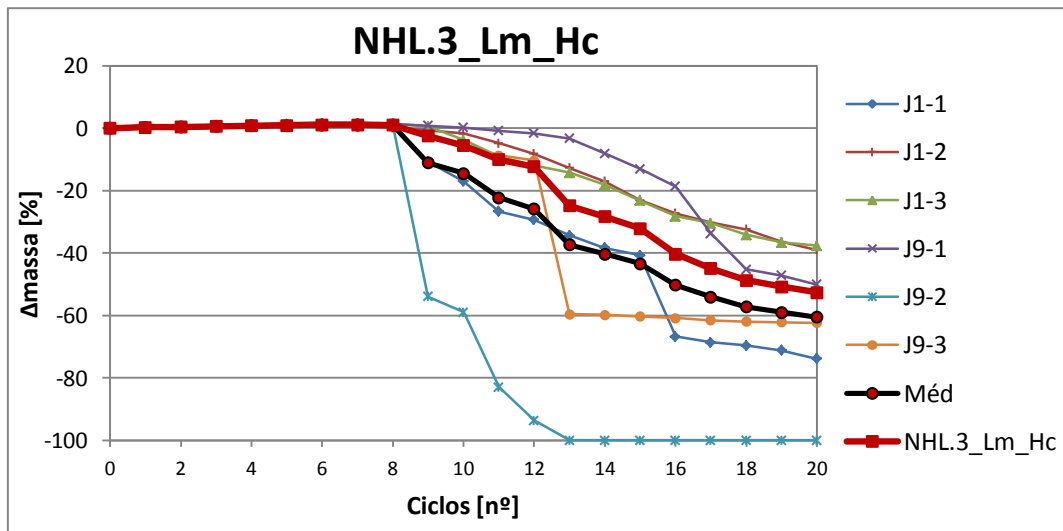
- Argamassas de cal aérea

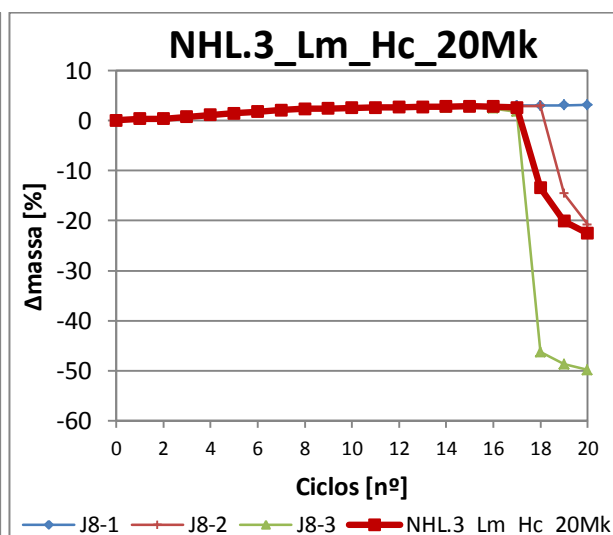
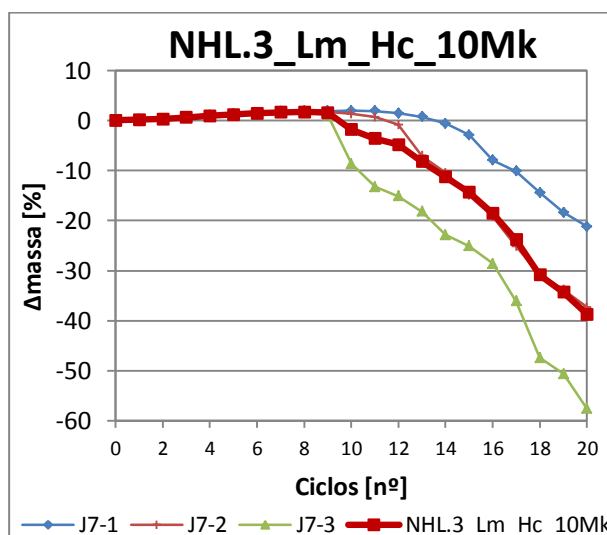
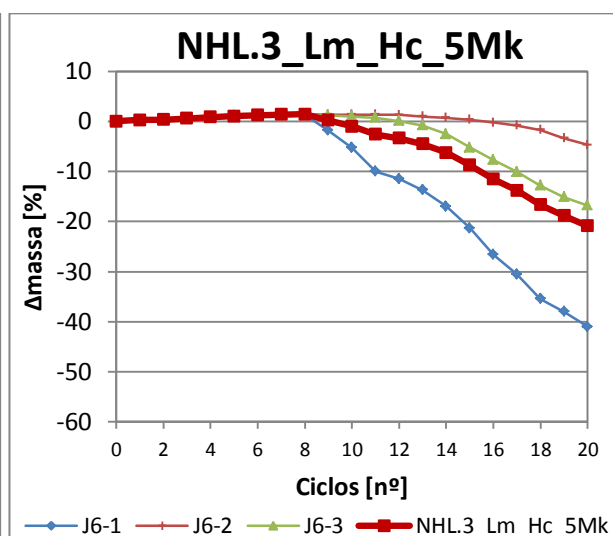
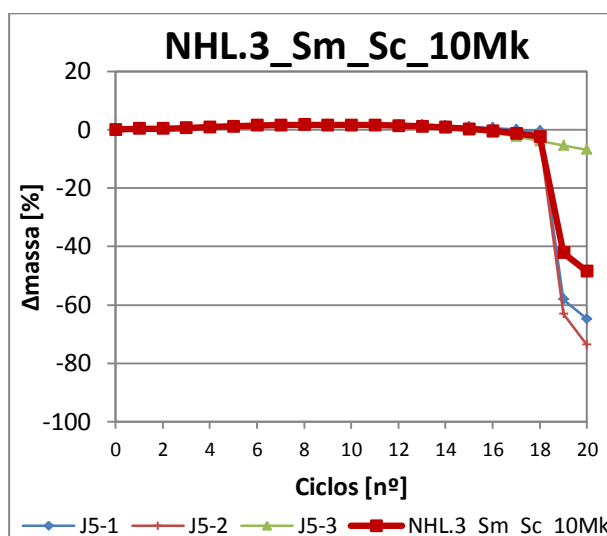
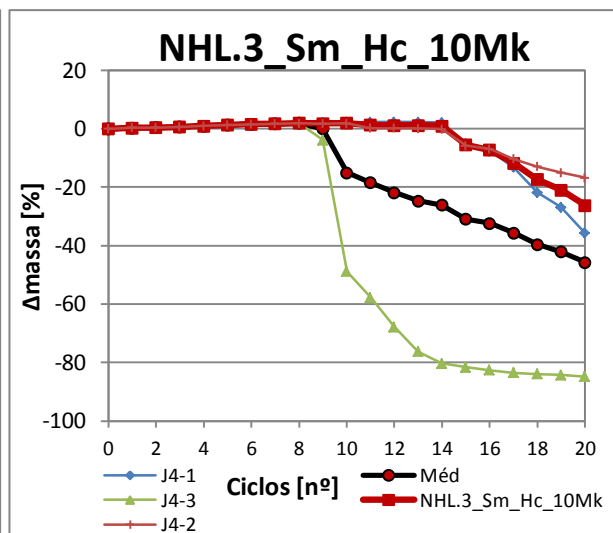
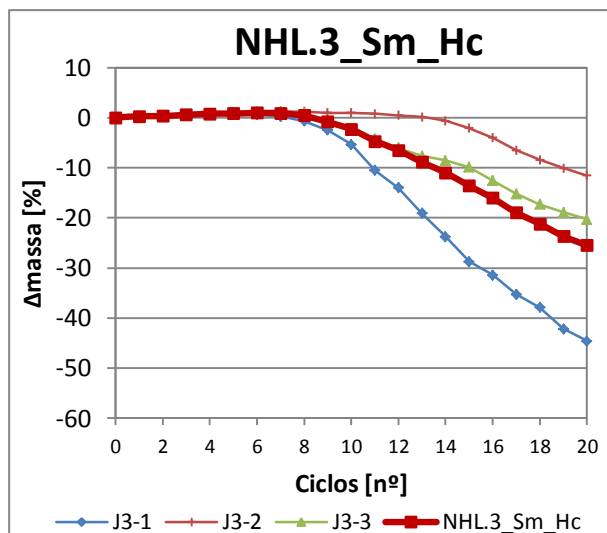






- Argamassas de cal hidráulica natural





A.9. Resultados da análise por difracção de raios X (DRX)

- Matérias primas

